

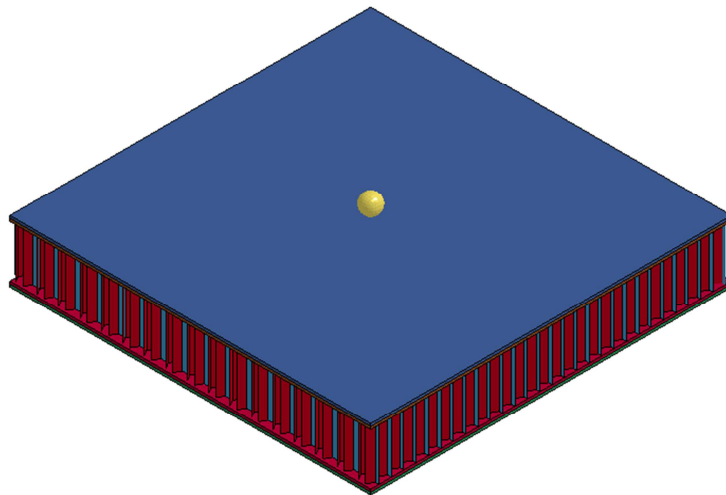


Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de MECÁNICA DE MEDIOS CONTÍNUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

ENSAYO BALÍSTICO DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO Y NÚCLEO DE HONEYCOMB



Autor: FERNANDO ARMERO PRESA

Tutor: JESÚS PERNAS SÁNCHEZ

Director: JOSÉ ALFONSO ARTERO GUERRERO

Leganés, octubre de 2013



Título: ENSAYO BALÍSTICO DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO Y
NÚCLEO DE HONEYCOMB

Autor: Fernando Armero Presa

Tutor: Jesús Pernas Sánchez

Director José Alfonso Artero Guerrero

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de
_____ de 2013 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la
Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



RESUMEN.

Las estructuras sándwich son cada vez más utilizadas y están adquiriendo una gran importancia por sus particulares características de ligereza y alta resistencia.

Este Proyecto Fin de Carrera se centra en el comportamiento de laminados de fibra de carbono con núcleo de honeycomb frente a impactos de alta velocidad, con el fin de estudiar la influencia del núcleo en estos casos, y obtener unas dimensiones óptimas de éste para alcanzar la mejor relación entre el peso del panel sándwich y la protección balística que ofrece.

Para este fin se ha utilizado un programa de elementos finitos y un software de programación matemático, mediante los cuales se ha creado un modelo numérico genérico que permite variar los diferentes parámetros del panel. Para la validación del modelo, se ha generado un panel de referencia con las mismas características que el usado por B. Buitrago en su tesis doctoral, consiguiéndose una diferencia máxima del 5% entre sus resultados experimentales y los resultados obtenidos numéricamente.

Una vez validado el modelo, se ha estudiado la cantidad de energía cinética del proyectil que es absorbida por cada parte del panel, en función de la velocidad de impacto. También se ha estudiado la influencia que tienen las dimensiones del núcleo en el límite balístico de la estructura, la delaminación de las pieles y la cantidad de energía absorbida por el propio núcleo. Las dimensiones a variar en las que se ha centrado este proyecto han sido la altura, el espesor de pared y el tamaño de celda.

Palabras clave: Honeycomb, impacto alta velocidad, estructura sándwich, laminado tejido, modelo numérico.

INDICE.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. CONTENIDO DEL PROYECTO.....	4
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. ESTRUCTURAS SÁNDWICH.....	5
2.2.1. Pielés.....	6
2.2.2. Núcleo.....	6
2.2.2.1. Núcleo tipo honeycomb.....	7
2.2.3. Adhesivo.....	9
2.3. PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS.....	9
2.4. IMPACTOS EN ESTRUCTURAS SANDWICH.....	11
2.4.1. Impactos de baja velocidad.....	11
2.4.2. Impactos de alta velocidad.....	11
3. MODELO EXPERIMENTAL.....	13
3.1. GEOMETRÍA Y MATERIALES.....	13
3.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.....	14
3.2.1. Medida de la velocidad de impacto.....	16
4. MODELO NUMÉRICO.....	17
4.1. INTRODUCCIÓN.....	17
4.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO.....	17
4.2.1. Geometría del núcleo.....	18
4.2.2. Geometría de las pieles.....	22
4.2.3. Geometría del proyectil.....	24
4.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE CADA PARTE.....	25
4.3.1. Núcleo.....	25
4.3.2. Pielés.....	26
4.3.3. Proyectil.....	27
4.4. CONDICIONES DE CONTORNO Y CONTACTOS.....	28
4.4.1. Condiciones de contorno.....	28
4.4.2. Contactos.....	29
5. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	30
5.1. VELOCIDAD RESIDUAL.....	30
5.2. ENERGÍA ABSORBIDA.....	31
5.3. DELAMINACIÓN.....	35
6. VARIACION DE PARÁMETROS.....	39
6.1. ALTURA.....	39
6.1.1. Velocidad residual.....	39
6.1.2. Absorción de energía.....	42
6.1.3. Delaminación.....	44
6.2. ESPESOR.....	49
6.2.1. Velocidad residual.....	50
6.2.2. Absorción de energía.....	52
6.2.3. Delaminación.....	53
6.3. TAMAÑO DE CELDA.....	56
6.3.1. Velocidad residual.....	57



6.3.2.	Absorción de energía.....	59
6.3.3.	Delaminación.....	60
6.4.	CONCLUSIONES.....	63
7.	CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS.....	66
7.1.	RESUMEN Y CONCLUSIONES.	66
7.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	68
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXO A: Modelo Genérico.....	70
	ANEXO B: Propiedades de las Partes	75
	ANEXO C: Reduced Input.....	84

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. MOTIVACIÓN.

Durante los últimos años, el uso de los materiales compuestos ha ido adquiriendo un gran protagonismo, no solo a nivel industrial, sino también en campos como la construcción, el transporte o la industria militar. Su principal desarrollo fue impulsado inicialmente por sectores como el aeroespacial o el aeronáutico, debido a sus excelentes propiedades. Estas propiedades son las que han propiciado su implantación en gran variedad de sectores.

Gracias al elevado presupuesto que manejan los sectores aeronáutico y aeroespacial (figura 1.1.1 y figura 1.1.2), se avanzó mucho en el conocimiento y en la reducción de los costes de producción de estos materiales. El objetivo principal de estos sectores era obtener materiales estructurales de gran resistencia con el mínimo peso posible, puesto que una pequeña reducción de peso significaba una considerable reducción de combustible.

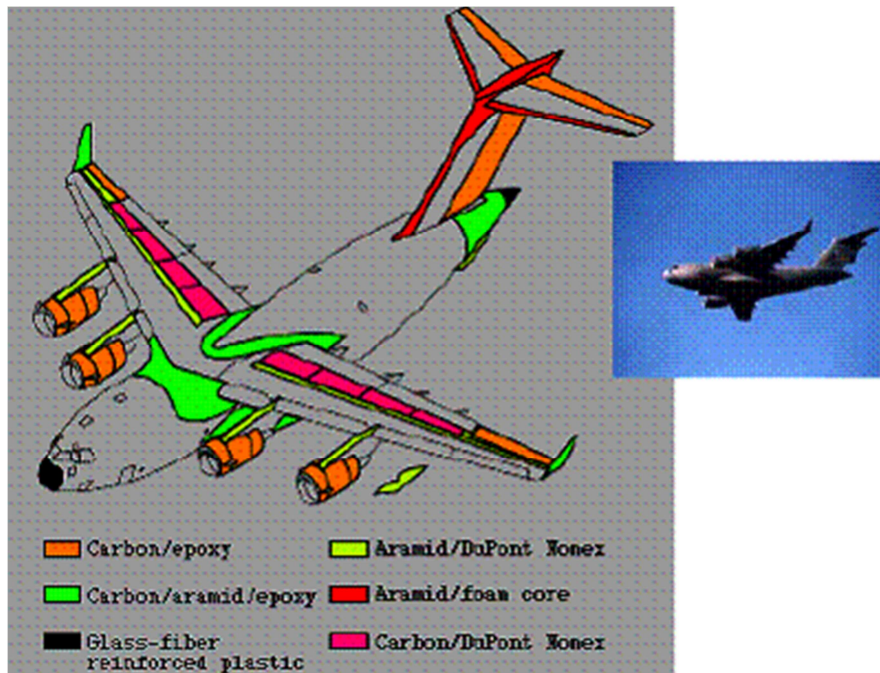


Figura 1.1.1: Detalle de los materiales compuestos usados en un avión.

Dentro de la gran variedad que presentan los materiales compuestos, uno de los más usados por las características antes mencionadas, baja densidad (4,5 veces menos que el acero) y alta resistencia (3 veces más que el acero), es la fibra de carbono en matriz epoxi, pues además posee una buena resistencia a la corrosión, una gran capacidad de aislamiento térmico y una importante resistencia a la variación de temperaturas, conservando su forma, gracias al hecho de utilizar una matriz termoestable.

A pesar de su elevada resistencia, estos materiales pueden ser gravemente dañados, e incluso atravesados, frente a un impacto perpendicular a alta velocidad. En sectores como el

aeroespacial, un impacto de estas características puede ser catastrófico, pues puede dañar partes muy importantes, sino esenciales, de la nave

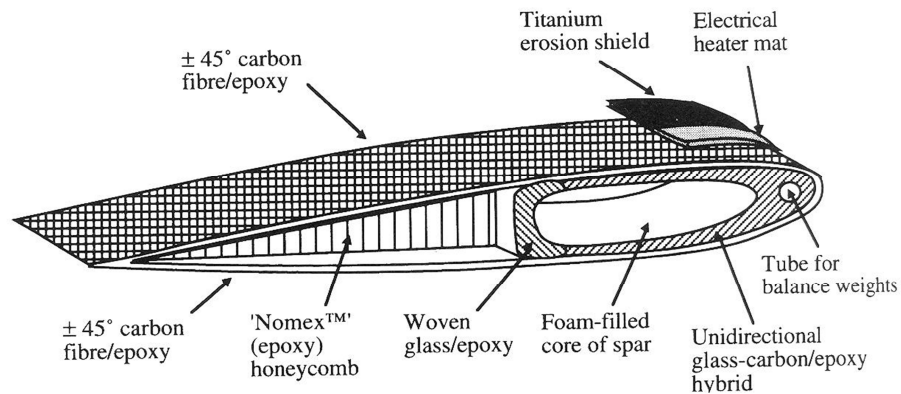


Figura 1.1.2: Sección de la pala del rotor de un helicóptero, donde se muestran los materiales compuestos usados.

1.2. OBJETIVOS.

Los ensayos experimentales suponen un gran coste, sobre todo cuando se quieren analizar varios factores para estudiar su influencia. Es por ello que los programas de elementos finitos (modelización numérica), son una solución a tener muy en cuenta en estos casos.

El objetivo principal es estudiar los beneficios (si los hay) que proporciona el núcleo de honeycomb en este tipo de panel sándwich, estudiando sobre todo la velocidad residual del proyectil al atravesar el panel y en último lugar como influye el núcleo de honeycomb en el límite balístico. De esta forma se intenta optimizar las características del núcleo para obtener la mejor protección balística con la menor cantidad de material posible.

Para ello, se ha buscado el crear un modelo genérico de un panel sándwich con núcleo de honeycomb, pudiendo variar de forma casi automática parámetros como:

- La velocidad y trayectoria del proyectil.
- Dimensiones del proyectil.
- Las dimensiones (largo, ancho, altura) del panel sándwich.
- Es espesor y el tamaño de las celdas hexagonales del núcleo de honeycomb.
- El lugar de impacto del proyectil.
- Espesor de las pieles.

Para alcanzar este objetivo se ha usado el software de elementos finitos, LS-DYNA®, y el software de programación MatLab, para crear el modelo genérico.

1.3. CONTENIDO DEL PROYECTO.

Este proyecto se divide en siete capítulos, los cuales se presentan a continuación.

El presente capítulo contiene los motivos que han llevado a cabo la realización de este proyecto, los objetivos a alcanzar y el contenido del mismo.

El segundo capítulo realiza una introducción a los materiales compuestos en los que se centra este proyecto, las estructuras sándwich. Se diferenciará entre los distintos tipos que existen y se describirán sus propiedades y características más importantes. Además se definen la clasificación de los impactos en función de la velocidad, estudiando sus principales efectos sobre el material.

El tercer capítulo describe el modelo experimental usado por B. Buitrago para la obtención de los resultados experimentales que se usarán para la posterior validación del modelo numérico. Se describe también el método usado para obtener esos resultados.

En el cuarto capítulo se detalla la creación del modelo numérico, describiéndose las propiedades y la forma de modelizar cada parte, así como el método utilizado para obtener el modelo genérico.

El capítulo cinco describe el proceso de validación del modelo numérico creado en base a los resultados experimentales del capítulo tercero. Además, una vez validado el modelo, se estudia la cantidad de energía cinética del proyectil que absorbe cada parte del panel sándwich, y la delaminación de las pieles.

El capítulo sexto se ocupa de estudiar la influencia que tienen ciertos parámetros del núcleo (altura, espesor y tamaño de celda) en los aspectos estudiados en el capítulo quinto: velocidad residual, absorción de energía por parte del núcleo y delaminación de las pieles.

En el séptimo y último capítulo se exponen las conclusiones obtenidas al finalizar este proyecto y los posibles trabajos futuros que se pudieran desarrollar.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas que se han consultado para la realización de este proyecto, y tres anexos donde se muestran los códigos generados mediante MATLAB® que permiten la obtención de los diferentes modelos numéricos usados y un 'reduced input' del modelo numérico creado mediante el programa de elementos finitos LS-DYNA®.

2. ANTECEDENTES.

2.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describen las propiedades y las características de las diferentes estructuras de los paneles tipo sándwich usados en la actualidad. Se describen a su vez los diferentes ensayos de impacto a los que se somete a estas estructuras: impacto a baja velocidad e impacto a alta velocidad.

2.2. ESTRUCTURAS SÁNDWICH.

Una estructura sándwich es una estructura constituida por dos pieles resistentes entre las que se interpone un material ligero (núcleo) y, por lo general, de baja densidad. Este núcleo, si bien aumentará el espesor y en mínima medida el peso de la nueva estructura comparada con una estructura simple, reportará grandes beneficios desde el punto de vista de la rigidez del conjunto.^[1]

Una estructura sándwich está compuesta por tres elementos fundamentales, tal y como se muestra en la figura 2.2.1: Las pieles exteriores, el núcleo del sándwich y la interfase de unión entre el núcleo y las pieles, que generalmente es un adhesivo.

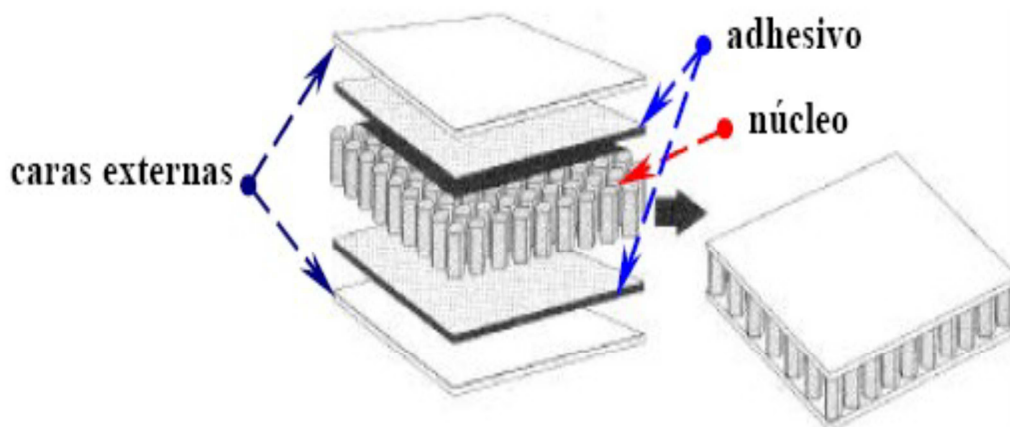


Figura 2.2.1: Esquema detallado de un panel sándwich con núcleo de honeycomb.

Cada uno de los elementos implicados cumple una función determinada. Las pieles exteriores son los elementos resistentes, generalmente realizados con materiales de mejores propiedades que el resto; el núcleo de material ligero, cuyas funciones principales son mantener separadas las pieles exteriores, brindar aislamiento (si cabe) y transmitir los esfuerzos cortantes de una cara a la opuesta; y por último la interfase, que tiene como función principal mantener unido el conjunto.

Entre las características más favorables de estos materiales de cara a su aplicación, cabe citar las siguientes^[2]:

- a) **Ligereza.**
- b) **Rigidez a la flexión.**
- c) **Aislamiento térmico.**

2.2.1. Pielés.

Las pieles exteriores están formadas por varias láminas delgadas, y son los elementos que aportan a la estructura la mayor resistencia, y por lo tanto están hechas con materiales de mejores propiedades que los demás elementos. Estos materiales pueden ser bien metálicos o no metálicos. Dentro de los “metálicos” se suelen emplear normalmente aleaciones de aluminio. Por otro lado, los laminados reforzados con fibras de carbono, de Kevlar o de vidrio, suelen ser las pieles “no metálicas” más empleadas. La utilización de un tipo u otro de pieles viene dado por el tipo de núcleo, ya que dependiendo de las características de este se emplean distintos materiales. ^[3]

2.2.2. Núcleo.

El núcleo se puede definir como aquel elemento de baja densidad y bajas características mecánicas que separa los revestimientos en una estructura sándwich.

Existen diferentes tipos de núcleo, de entre los que destacan las espumas, las placas nervadas, y los núcleos tipo honeycomb.

Las espumas suelen ser de poliuretano y de poliestireno, usando normalmente pieles metálicas (en el caso de espumas de poliuretano), laminados de materiales compuestos y pieles de materiales termoplásticos (solo con espumas de poliestireno).

Los materiales que se usan para fabricar las placas nervadas suelen ser metales y materiales compuestos, utilizando además de pieles metálicas, pieles de amianto.

Los núcleos tipo honeycomb son los que presentan una mayor variedad de materiales, pues se fabrican desde de aluminio y de nomex (fibra de aramida/resina fenólica) hasta de madera y fibra kevlar. Dependiendo del material usado para fabricar el núcleo se utilizan unas pieles u otras, tal y como se muestra en la tabla 2.2.2.1 ^[4]:

A continuación, en la tabla 2.2.2.1, se recoge un resumen de los materiales más utilizados para pieles y para núcleos, así como sus disposiciones dentro del panel tipo sándwich

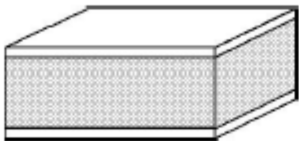
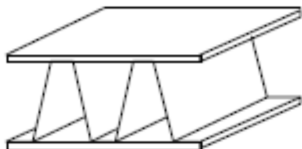
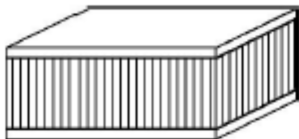
ESTRUCTURA SANDWICH		NÚCLEO	PIELES
	Espuma de poliuretano	Metales	
	Espuma de poliestireno	Laminados	
		Termoplásticos	
ESPUMA			
	Metales	Amianto/Cemento	
	Materiales compuestos	Metales	
		Amianto/cemento	
PLACA NERVADA			
	Aluminio	Contrachapados	
	Kevlar	Laminados	
	Madera		
	Nomex	Aluminio	
HONEYCOMB			

Tabla 2.2.2.1: Clasificación de las diferentes estructuras sándwich.

2.2.2.1. Núcleo tipo honeycomb.

En este apartado se explicará de forma más extensa el núcleo tipo “nido de abeja” o honeycomb, pues es el núcleo que usará la estructura sándwich que se estudia en este proyecto.

Los elementos y parámetros que caracterizan a este tipo de núcleos honeycomb son:

- A. CELDILLA: Es la figura geométrica que se repite a lo largo y ancho del núcleo. Se pueden encontrar diferentes tipos de celdillas.
- Hexagonal.
 - Rectangular.
 - Trébol o seta.

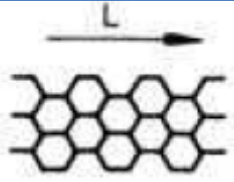
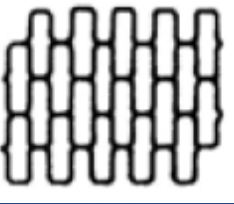
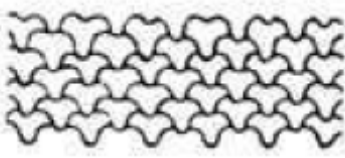
CONFIGURACIÓN	DENOMINACIÓN	APLICACIÓN
	HEXAGONAL	Es la más utilizada. Se puede fabricar por expansión y por ondulación.
	RECTANGULAR	Se fabrica sometiendo al hexagonal a una sobre-expansión en la dirección perpendicular a las superficies plegadas.
	Seta (Flex-Core)	Configuración extremadamente flexible, que puede acoplarse con facilidad a formas complejas.

Tabla 2.2.2.1.1: Clasificación del tipo de celda del núcleo tipo "honeycomb".

- B. NODO: Zona de pegado entre celdilla.
- C. ESPESOR DE PARED: Espesor de la hoja que forma la celdilla.
- D. DIRECCIÓN LONGITUDINAL: Dirección perpendicular al sentido expansión del núcleo o la línea recta paralela a los nodos (se denomina ribbon y se representa con la letra L).
- E. DIÁMETRO: Distancia entre lados opuestos de una celdilla o diámetro del círculo inscrito en una celdilla.
- F. ALTURA: Distancia entre las caras externas del núcleo.
- G. DENSIDAD: Parámetro que depende del espesor de hoja, del material y diámetro de la celdilla.

Los núcleos tipo “honeycomb” presentan las siguientes características:

- Soportan cargas a compresión y a tracción.
- Tienen excelente rigidez y resistencia específica.
- Bajo peso.
- Tiempo y coste de fabricación reducidos.
- Se utilizan en zonas donde no se requieran grandes solicitaciones mecánicas (Puertas, trampas, superficies de control, panza del avión...).

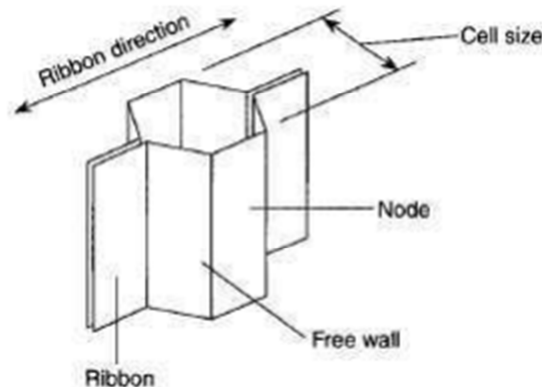


Figura 2.2.2.1.1: Celda hexagonal que forma la estructura honeycomb.

Como se puede observar en la figura 2.2.2.1.1, para la creación del honeycomb, las celdillas se crean pegándose las caras denominadas “nodos”. Es por eso que los lados paralelos a estas caras de la celdilla tienen un doble espesor que el resto de caras, pues están compuestas por un total de dos lados. Se tendrá en cuenta esta característica a la hora de hacer el modelo numérico del núcleo de honeycomb.

2.2.3. Adhesivo.

Con el fin de unir la piel al núcleo se suele colocar una capa de adhesivo entre ellos, aunque no es siempre necesario. Dependiendo del procedimiento que se emplee para la fabricación del sándwich se debe utilizar un film de adhesivo o no. Si se lleva a cabo un procedimiento de precurado, en el cual se forman los empilados de fibra en una primera fase y después se unen al núcleo, es necesario emplear una capa de adhesivo entre cada revestimiento y el núcleo. En cambio, si se fabrica mediante cocurado no es necesario emplear una capa de adhesivo, ya que la resina de las láminas de fibra puede actuar como medio de unión entre los revestimientos y el núcleo.

2.3. PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS.

El “método de los elementos finitos” (MEF en castellano o FEM en inglés) es una técnica de cálculo numérico para la resolución de problemas que permite la obtención de una solución aproximada mediante la convergencia del problema a la solución real.

La idea principal del método consiste en dividir un sistema continuo en un número finito de elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos (figura 2.3.1).

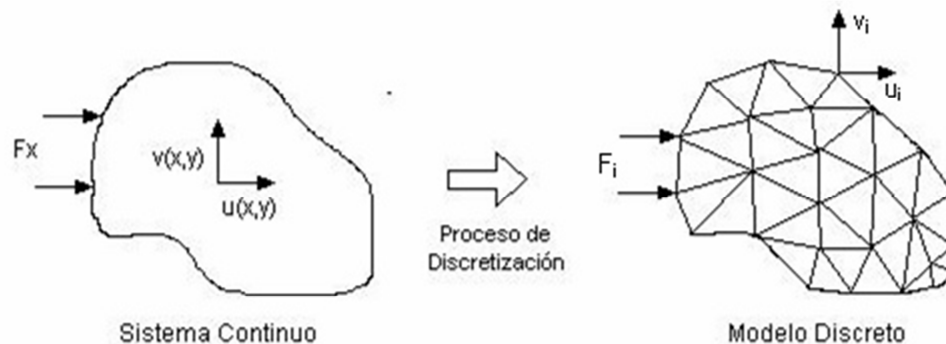


Figura 2.3.1: Proceso de discretización de un sistema continuo.

Otra definición posible sería, un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. ^[13]

La solución obtenida por los programas de elementos finitos es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos (nodos). En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El programa de elementos finito que se ha utilizado para llevar a cabo este proyecto ha sido el LS-DYNA.

LS-DYNA es un código explícito de elementos finitos de propósito general usado para analizar la respuesta de grandes deformaciones de estructuras (incluyendo interacción fluido-estructura). Se trata de un código especialmente apropiado para la resolución de problemas dinámicos y no lineales; posee además una gran versatilidad ya que permite definir el modelo de comportamiento del material a través de subrutinas de usuario escritas, en este caso, en MATLAB.

Las tareas que lleva a cabo este programa son:

- ✓ Preproceso.
- ✓ Cálculo.
- ✓ Postproceso.

La herramienta que usa este software para crear el modelo y posteriormente analizarlo es el LS-PrePost. Una vez que se ha creado el modelo completo en Ls-PrePost (preproceso), el LS-DYNA lleva a cabo la simulación (cálculo), generando todos los datos, que previamente en Ls-

PrePost se ha definido que queríamos obtener. Estos datos obtenidos los visualizamos en Ls-PrePost (postproceso), obteniendo tanto los resultados numéricos como la simulación en video.

2.4. IMPACTOS EN ESTRUCTURAS SANDWICH.

Dependiendo de la aplicación para la que se utilicen, estos materiales estarán sometidos a impactos localizados. Un impacto puede causar una considerable reducción de las propiedades mecánicas de la estructura sándwich. Por este motivo es necesario caracterizar, predecir y prevenir el daño debido al impacto sobre este tipo de materiales.

Pueden clasificarse en función de la velocidad a la que se produce:

- Impacto de baja velocidad.
- Impacto de alta velocidad.

2.4.1. Impactos de baja velocidad.

En un impacto de baja la respuesta de la estructura es global y está controlada por la geometría y las condiciones de contorno.

Generalmente este tipo de impactos son producidos por el choque de un objeto de gran masa contra una estructura/componente. También pueden presentarse durante el proceso de manufactura, durante el servicio y debido al ambiente en el que trabaja dicho elemento. Los daños producidos por este tipo de impactos en fabricación y mantenimiento se deben a golpes de herramientas, cajas de herramientas y/o equipamiento de trabajo sobre la superficie de la estructura generalmente producida por negligencia.

El principal problema de este tipo de impactos, es que el daño resultante (principalmente delaminaciones) en muchas ocasiones no es detectado por inspección visual, quedando en servicio piezas dañadas previamente. Muchas veces, el impacto que tiene que sufrir el material para que sea visible es mucho mayor que el impacto por el cual se produce una pérdida importante de propiedades mecánicas.

2.4.2. Impactos de alta velocidad.

Un impacto de alta velocidad se produce cuando el ratio entre la velocidad de impacto frente a la velocidad de propagación de las ondas de compresión a lo largo del espesor es mayor que la deformación de rotura en dicha dirección ^[5]. Se trata de un proceso en el que no existe una situación de equilibrio y, en consecuencia, distintas zonas de la estructura impactada pueden estar sometidas a estados tensionales muy diferentes. La velocidad de deformación es varios órdenes de magnitud superior a la correspondiente a situaciones estáticas.

En una estructura de material compuesto los procesos de impacto de alta velocidad están controlados por:

- Las propiedades mecánicas del proyectil y la estructura.
- Las condiciones de impacto (el ángulo de la trayectoria del proyectil).
- La configuración del laminado.
- La geometría del proyectil y la placa.

De manera general, el fallo en los materiales compuestos por impacto balístico ocurre en la zona cercana al impacto, pudiendo intervenir diferentes mecanismos de fallo. En los materiales compuestos de fibra de carbono/epoxi, este tipo de impacto produce una respuesta localizada del material alrededor del punto de impacto.

Algunos de los parámetros más importantes que se pueden estudiar mediante este tipo de impacto, y que son objeto del presente proyecto, son:

- **Límite balístico:** velocidad por debajo de la cual un proyectil específico no provocará fallo por penetración. Generalmente esta velocidad se expresa en términos de probabilidad.
- **Velocidad residual:** velocidad con la que sale el proyectil al atravesar la probeta. A partir de la velocidad residual se puede determinar la energía absorbida por la probeta.

3. MODELO EXPERIMENTAL.

En el este apartado se describen las características del modelo que se ha usado como referencia, a partir del cual se variarán los diferentes parámetros a estudiar.

El modelo tiene como referencia el usado por B. Buitrago en su tesis doctoral ^[7], para un vez terminado poder verificar que el modelo numérico es válido.

3.1. GEOMETRÍA Y MATERIALES

En la figura 3.1.1 se puede observar la geometría del panel sándwich que se usará como modelo base y de validación.

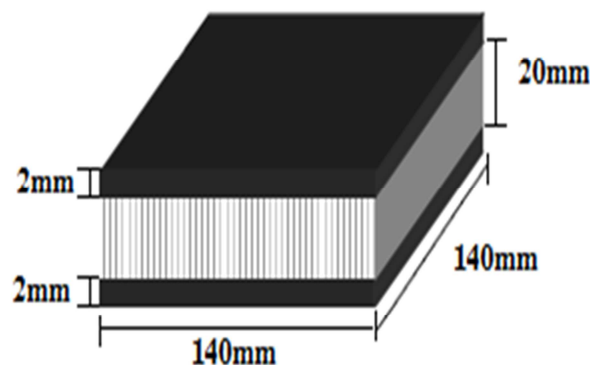


Figura 3.1.1: Dimensiones del panel sándwich.

▪ Pielés.

➤ Geometría

Las pieles estarán formadas por un laminado de tejido, compuesto por un total de 10 láminas de 0,2 mm de espesor cada una. En total, las pieles tendrán unas dimensiones de:

- Ancho: 140 mm
- Largo: 140 mm
- Altura/Espesor: 2 mm

➤ Material

Las pieles están formadas por un laminado de fibra de carbono (AGP-193-PW, de Hexcel Composites) reforzado con una matriz de resina tipo epoxi .

- **Núcleo (honeycomb).**

- **Geometría**

El núcleo de honeycomb, estará compuesto por una configuración hexagonal y un tamaño de celdilla de 3/16" (4,8 mm). El espesor de las paredes que componen el honeycomb será de 60 μ m. Las dimensiones totales del núcleo son:

- Ancho: 140 mm
- Largo: 140 mm
- Altura/Espesor: 20 mm

- **Material**

La estructura que forma el honeycomb es de aluminio AA-3003 H12 (aleación aluminio-manganeso), material que presenta muy buena resistencia a la corrosión.

- **Proyectil.**

- **Geometría**

El proyectil utilizado será esférico, de 7'5 mm de diámetro. La razón de elegir un proyectil esférico es evitar los problemas asociados al giro de éste según el eje perpendicular a la trayectoria de vuelo (en los ensayos experimentales).

- **Material**

El material usado para el proyectil esférico es el acero, para evitar que durante el impacto sufriese deformación plástica, pudiéndose usar la hipótesis de proyectil rígido.

3.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

Los ensayos experimentales de impactos a alta velocidad realizados por B. Buitrago ^[7] fueron realizados utilizando un cañón de gas (figura 3.3.1), con el que se disparaban los proyectiles esféricos.



Figura 3.3.1: Cañón usado para ensayos de balística.

El conjunto en el que se encuentra el cañón puede dividirse en tres partes:

- Sección de instrumentación: Permite variar la presión con la que será cargado el depósito de gas.
- Sección de carga del proyectil: donde se inserta el proyectil (puede ser cilíndrico o esférico).
- Sección de impacto: está constituida por el útil de soporte de las probetas de ensayo.

Para obtener la información necesaria para determinar la velocidad del proyectil se utilizó una cámara de vídeo de alta velocidad (hasta 250.000 fotogramas por segundo) y un foco de luz de alta intensidad (1200W, con una serie de dispositivos ópticos para mejorar el rendimiento del sistema de monitorización del impacto), que permitía obtener la grabación de una secuencia de imágenes del momento de impacto, así como del momento durante el cual el proyectil perfora la estructura sándwich y la atraviesa (en caso de que esto último ocurriese).



Figura 3.3.2: Detalle de la cámara y el foco situados sobre la sección de impacto.

Para poder alcanzar un amplio intervalo de velocidades de impacto, empleó dos tipos diferentes de gases (stargon para las velocidades más bajas y helio para las más altas), los cuales al variar su presión pueden generar velocidades entre 80 m/s y 800 m/s. Ambos tipos de gases se caracterizan por ser inertes, por no ser inflamables y por poder verse en el medio ambiente sin perjudicarlo. En la figura 3.3.2 se muestra el cañón y la colocación de la cámara de video de alta velocidad.

3.2.1. Medida de la velocidad de impacto.

Como se ha mencionado antes, la velocidad de impacto se midió por medio de la cámara de alta velocidad ayudada por el foco de alta intensidad, a partir del cálculo del desplazamiento del proyectil entre dos o más frames consecutivos y la frecuencia de toma de imágenes de la cámara. Puesto que se conocen las medidas del proyectil, se puede saber las medidas de un pixel y de esta forma conocer el desplazamiento. Puesto que las medidas varían en función de la distancia a la que se coloca la cámara (que puede cambiar ligeramente por accidente), es necesario realizar la medida de cada pixel en cada ensayo. Por lo tanto, la velocidad es calculada como la relación entre el ratio de cuadros (frames) y la distancia recorrida por el proyectil entre el número de cuadros seleccionados.

4. MODELO NUMÉRICO.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Como ya se ha explicado previamente, uno de los objetivos del presente proyecto es crear un modelo genérico que permita generar de forma casi automática el panel sándwich con un núcleo de honeycomb.

Definiendo previamente las características a variar, se genera un archivo “txt” con MATLAB® (en este caso con extensión “*.cfile”), que una vez abierto con el programa de elementos finitos LS-PrePost®, generará el panel sándwich con un núcleo tipo honeycomb.

4.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO

Según lo explicado anteriormente, se utilizará el programa LS-PrePost (herramienta del software LS-DYNA®) para crear el modelo numérico.

Una de las principales características de este software es la posibilidad de generar un modelo mediante comandos, no siendo estrictamente necesario el uso de las herramientas que proporciona Ls-PrePost, las cuales se muestran en la figura 4.2.1.

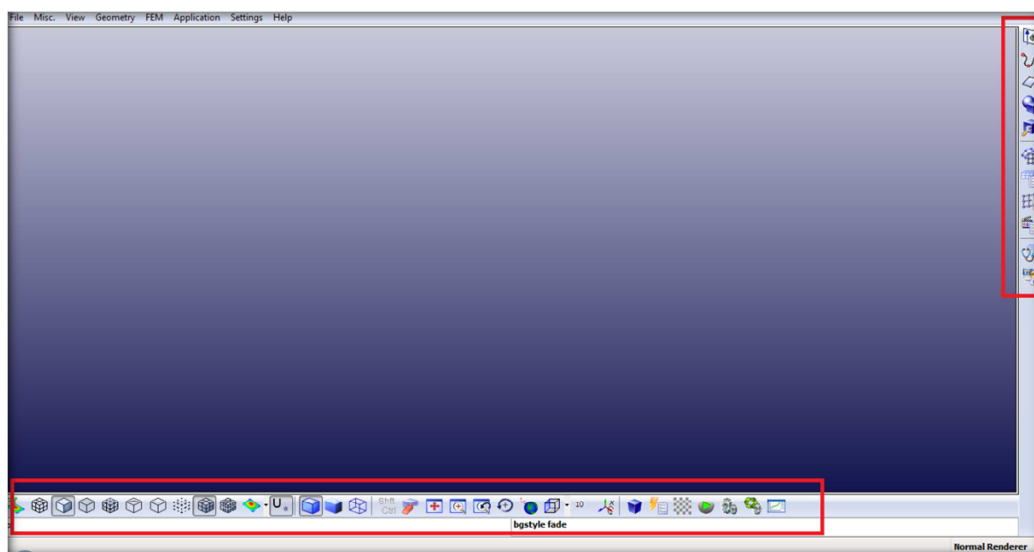


FIGURA 4.2.1. Herramientas de LS-PrePost

Cada acción que permite Ls-PrePost (crear un cubo, crear una placa, girar, trasladar, borrar,...) está asociada a un comando (“Command Line”), como se puede observar en la figura 4.2.2.

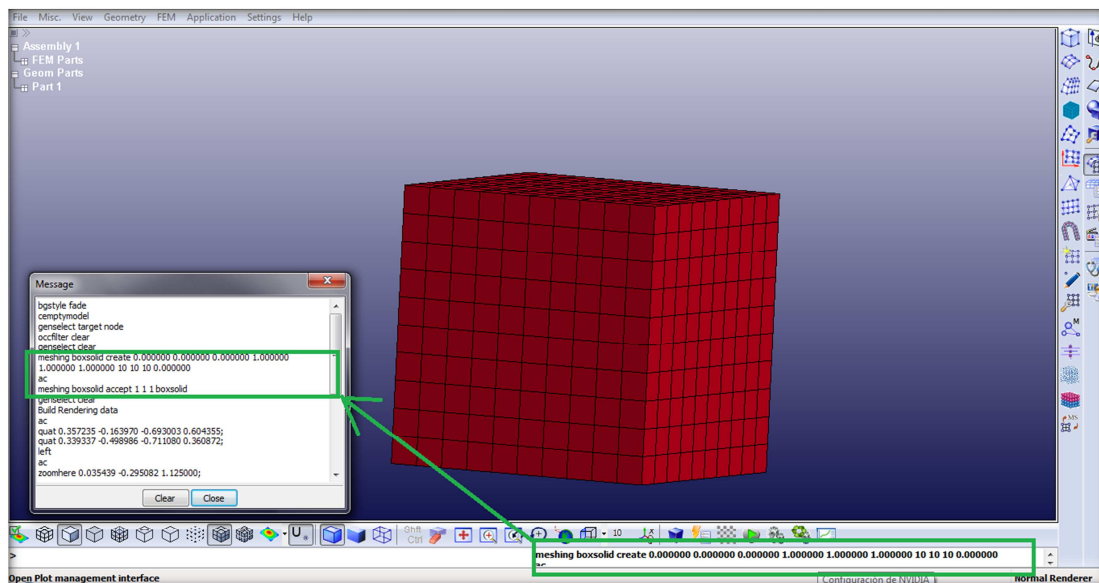


FIGURA 4.2.2. Acciones permitidas en LS-PrePost

Mediante “Command Lines” se generará todo el modelo, haciendo posible la creación de un modelo generalizado (mediante un archivo “*.cfile” que reunirá todos los comandos) para poder variar las dimensiones y otras propiedades ya mencionadas de forma casi automática. De este modo no se creará un modelo único, sino un modelo que nos permita estudiar la influencia de varias características ante una misma situación de impacto de proyectil.

En este capítulo se describe como se ha creado el modelo a estudiar con el programa mencionado.

4.2.1. Geometría del núcleo.

• Primera celda.

Para hacer el honeycomb, he creado un primer semi-hexágono inicial, usando luego la función “copiar y trasladar” para formar el núcleo entero.

Para ello he usado elementos 4N-Shell, placas 2D con 4 nodos. Como indica el nombre, para definir la placa, hay que definir los 4 nodos que formarán las 4 esquinas de ésta. Usando este tipo de elemento se dota al núcleo de la altura deseada.

La herramienta para tal acción la encontramos en el panel derecho del Ls-PrePost: Element and Mesh/Shape Mesher/Entity -> 4N_Shell:

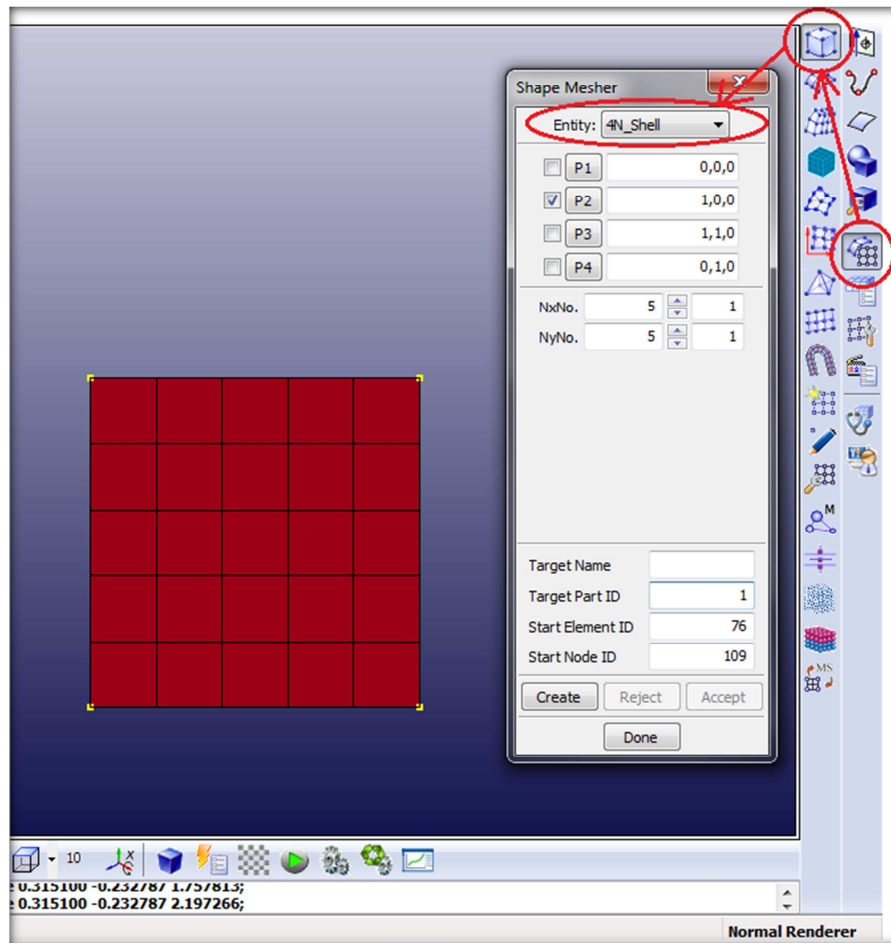


FIGURA 4.2.1.1: Creación de un elemento placa (SHELL).

Como se puede observar en la figura 4.2.1.1, la placa quedará geométricamente definida por los nodos P1, P2, P3 y P4 indicando su posición según los ejes cartesianos XYZ. Para definir la malla que posteriormente se necesitará para el cálculo de la simulación, hay que definir los parámetros “NxNo.” y “NyNo.”, los cuales indican el número de elementos en que se dividirá la placa según el eje X y el eje Y respectivamente.

El comando equivalente para crear el archivo “.cfile” que genere la misma acción es:

meshing 4pshell create NxNo NyNo P1x P1y P1z P2x P2y P2z P3x P3y P3z P4x P4y P4z

meshing 4pshell accept A B C shell_4p

Siendo:

- **NxNo; NyNo:** Los parámetros antes mencionados para definir el mallado.
- **Px; Py; Pz:** Las coordenadas de cada uno de los nodos que definen la placa.
- **A:** Indica el “Part ID”. Éste número define la PART a la que pertenece el elemento.
- **B, C:** Indican el número de elemento/nodo en el que empieza a formarse la placa. No es necesario definirlos.

Por lo tanto, usando estos elementos Shell, se forma la primera celda, la cual tendrá la geometría mostrada en la figura 4.2.1.2:

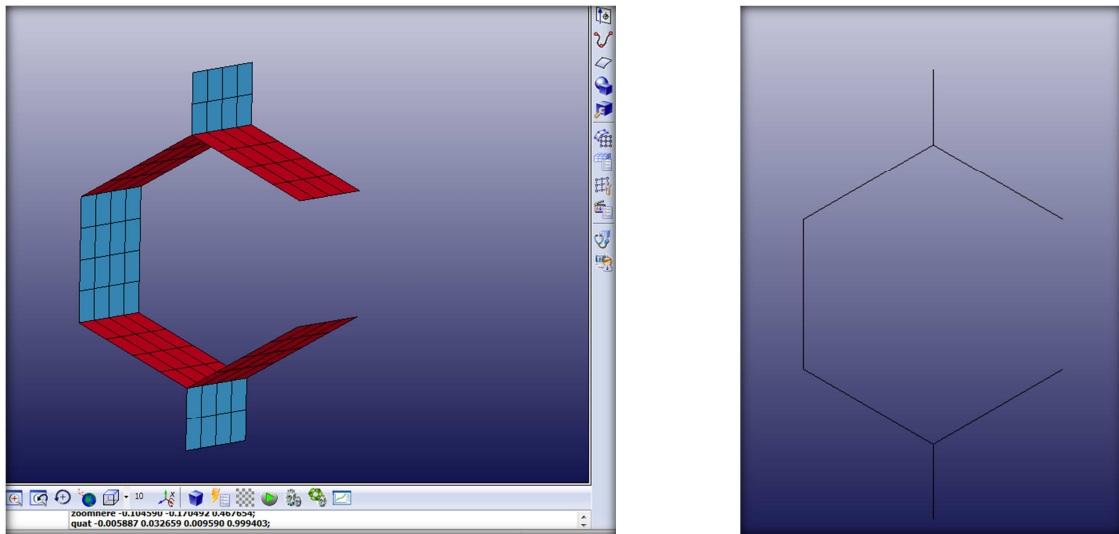


FIGURA 4.2.1.2 Geometría de la celda formada.

Como se observa en la figura 4.2.1.1, la primera celda, y por lo tanto la geometría base a partir de la cual vamos a formar el núcleo entero, está formado por 7 placas. La razón de esta geometría es:

- No es un hexágono perfecto pues le falta uno de los lados. La razón es que para formar el honeycomb se va a “copiar y trasladar” esta geometría de manera que se formen el resto de celdas. Al hacer esto, el lado que se observa que falta será “rellenado” por el lado izquierdo del hexágono al trasladar la celda.
- Los elementos Shell que no pertenecen a la geometría hexagonal, que tienen la mitad de “altura”, sirven para poder hacer la traslación en el eje Y.
- Los diferentes colores que se observan son para denotar que siendo el mismo material, son diferentes PARTES, pues los lados verticales (azules) tienen el doble de espesor, como ya se ha descrito en el 2.2.2.1 (Figura 2.2.2.1.1).

- **Honeycomb**

Con la geometría de la celda inicial descrita, se crea el total del núcleo. Para ello se usará la herramienta de Ls-PrePost “Trasladar”. Esta herramienta tiene la opción de copiar y trasladar a la vez el elemento, pudiendo crear así la geometría entera del honeycomb. En la figura 4.2.1.3 se observan los pasos a seguir para conseguir esta traslación.

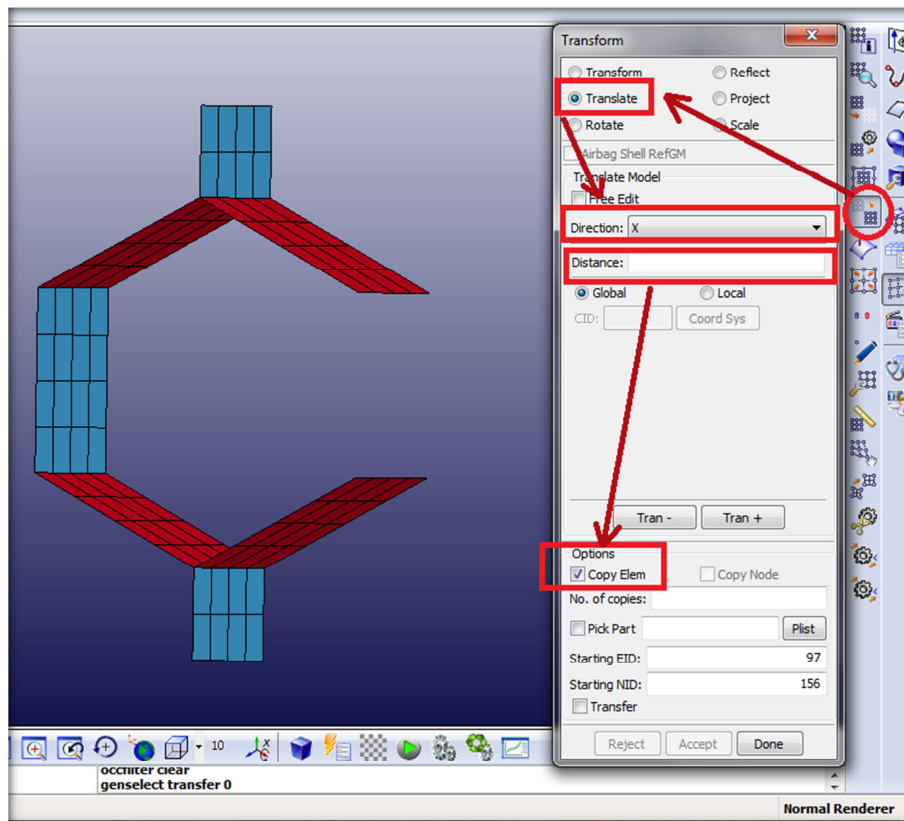


FIGURA 4.2.1.3. Celda inicial

Los comandos equivalentes para crear el archivo “*.Cfile” que generen la misma acción son:

```
translate_model Xt Yt 0 copy 0 0  
translate_model accept 0
```

Siendo:

- **Xt; Yt:** Los parámetros para definir el lugar donde trasladar la figura seleccionada.

En la figura 4.2.1.4 se puede ver como mediante el programa Matlab, creando un doble bucle “for”, se genera todo el núcleo de forma automática.

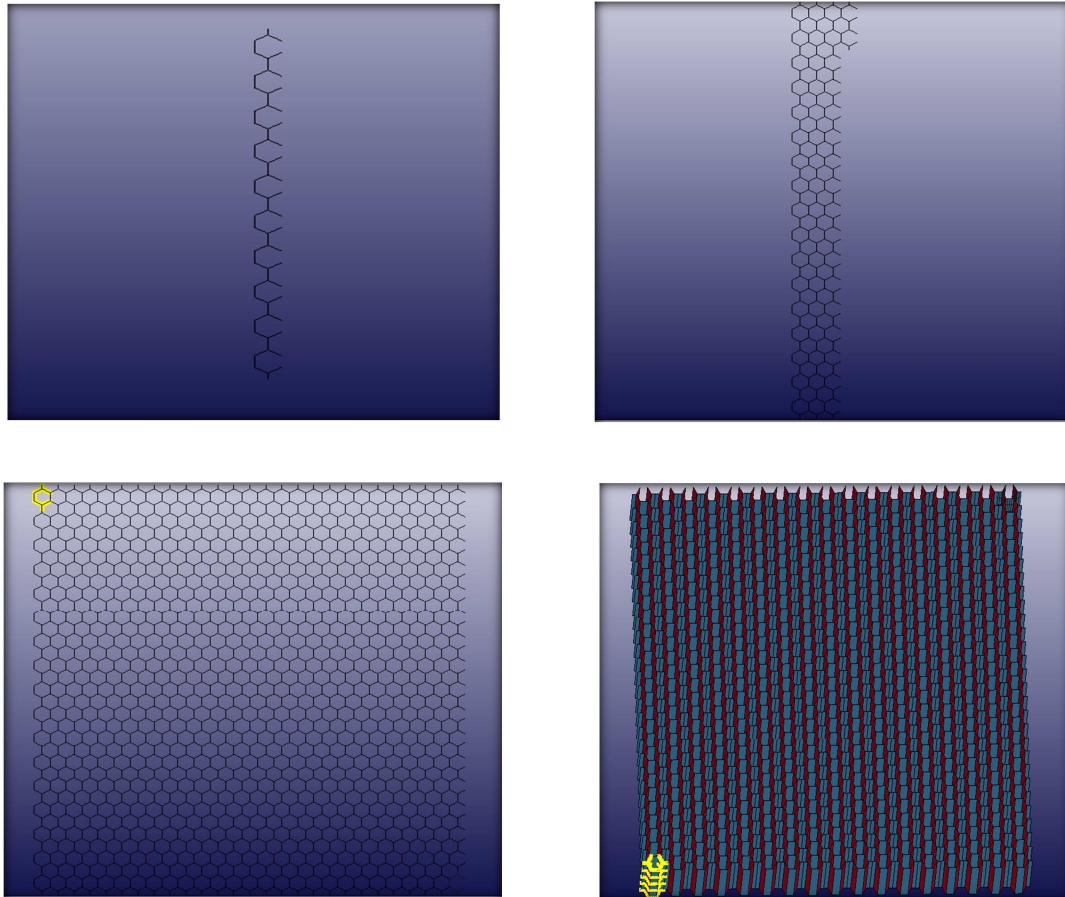


FIGURA 4.2.1.4. Generación del Núcleo

4.2.2. Geometría de las pieles

Cada piel estará formada por 2 láminas, simulando cada lámina un total de 5 láminas de tejido y todas colocadas en la misma dirección, estando así formada cada piel por 10 láminas. El hecho de dividir cada piel en dos partes es para poder hacer el estudio de la posible delaminación que pueden sufrir por el impacto del proyectil.

Para la creación de las pieles se han usado elementos TSHELL (elementos placa con espesor). Este tipo de elemento se define por ser un elemento placa formado por 8 nodos, es decir, una placa con espesor, obteniendo de esta forma información en las tres dimensiones (3D). La elección de los elementos Tshell en vez de elementos sólidos, ha sido principalmente para ahorrar tiempo de computación, y porque es un elemento muy apropiado para definir un laminado, pues te permite definir en un solo elemento Tshell el número de láminas, su espesor, su dirección.... Para crear las pieles con este tipo de elemento, primeramente se crea un elemento SHELL (igual que con la primera celda) a modo de piel, convirtiendo luego ese elemento placa en un elemento Tshell al definir un espesor.

Para la creación del Tshell a partir de un elemento Shell, se deben seguir los pasos que se observan en la figura 4.2.2.1:

- Element and Mesh/Element Generation/Solid/Shell_Offset
- Definir un espesor (thickness) y el número de elementos en que el elemento se dividirá en la dirección del espesor.
- Seleccionar “Create tshell element”.

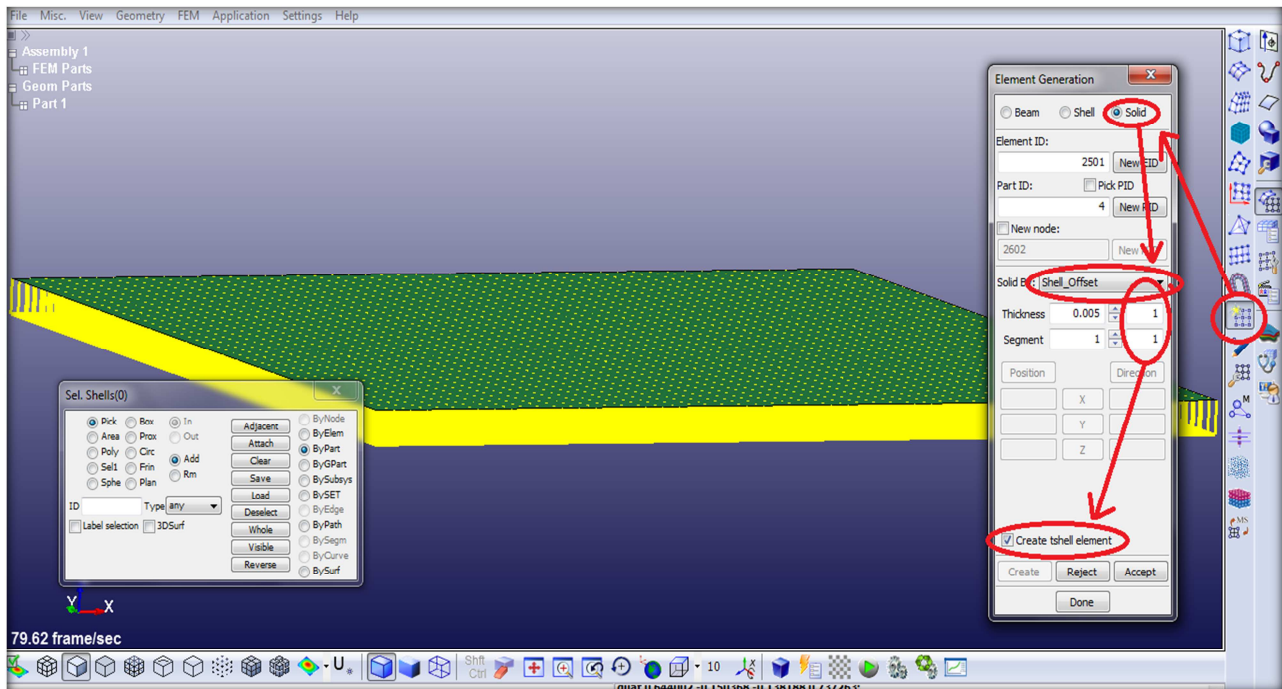


FIGURA 4.2.2.1 Creación del Tshell a partir de un elemento Shell

Mediante los comandos cfile, usamos:

genselect shell add part X/0
elgenerate solid shelloffset Y en1 ES SG

Siendo:

- **Part X/0:** hace referencia a la parte a la pertenece el elemento Shell (también puede hacerse por elementos).
- **Y:** usamos esta variable para designar el nuevo número que definirá la nueva parte Tshell.
- **ES:** espesor que tendrá el elemento Tshell.
- **SG:** define el mallado en la dirección en la que se crea el espesor.

Definidas las pieles el modelo queda de la siguiente manera indicada en la figura 4.2.2.2.

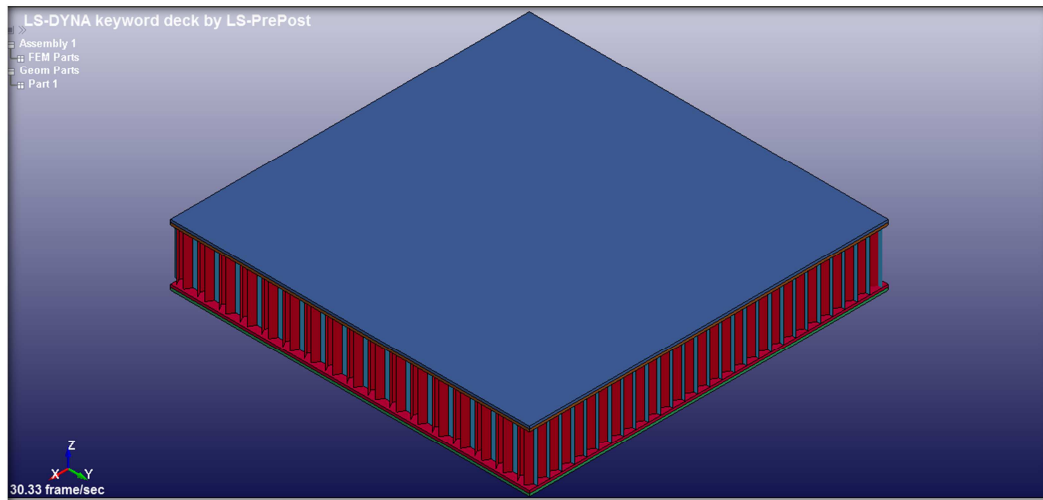


FIGURA 4.2.2.2. Geometría del panel sándwich creado.

4.2.3. Geometría del proyectil

El proyectil usado en el modelo numérico será una esfera. Su creación será muy parecida a la creación de los elementos Shell. En la figura 4.2.3.1 se observa el resultado final del panel con el proyectil.

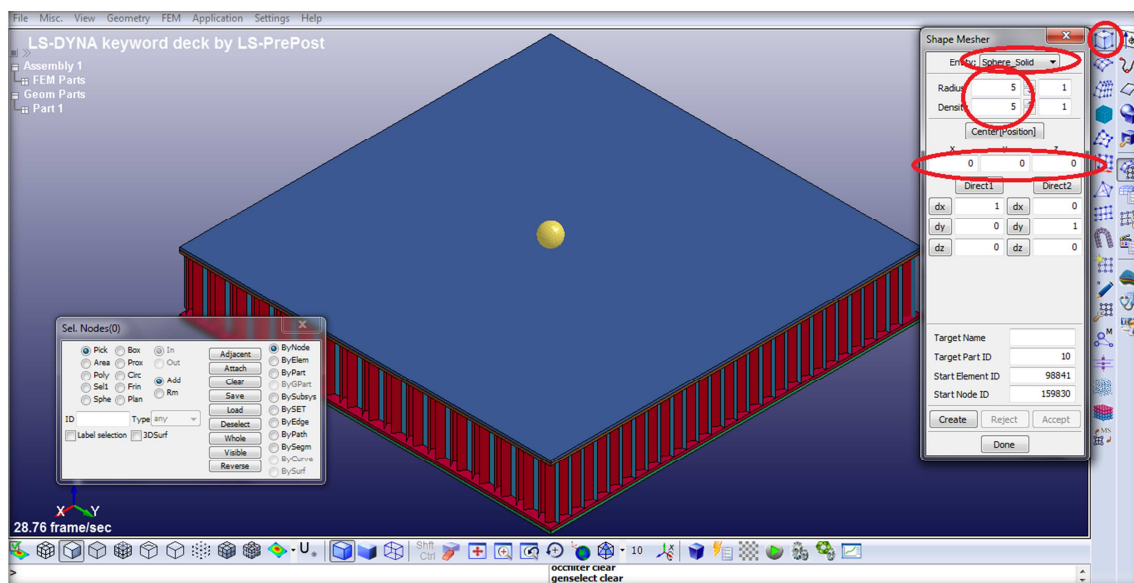


FIGURA 4.2.3.1: Panel Sándwich con el proyectil.

El comando cfile para la creación de la esfera es:

```
meshing spheresolid create Px Py H R NR 1 0 0 1 0  
meshing spheresolid accept 9 1 1 spheresolid
```

Siendo:

- **Px; Py:** Las coordenadas para la creación de la esfera.
- **H:** altura a la que se colocará la esfera.
- **R:** radio de la esfera.
- **NR:** mallado de la esfera.

4.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE CADA PARTE.

4.3.1. Núcleo.

Como ya se ha mencionado en el capítulo 3 sobre el modelo experimental, el material usado para el honeycomb es una aleación de aluminio y manganeso, (aluminio AA-3003 H12). Las principales propiedades mecánicas y físicas que caracterizan a este material son:

- Densidad, δ : $2.7403 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$
- Módulo de Young, E : $6.8948 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
- Coeficiente de Poisson, ν : 0.33
- Límite elástico, σ_y : $1.31 \cdot 10^8 \text{ Pa}$

El modelo constitutivo elegido para el material del núcleo se corresponde con un material elastoplástico que se rige por una ley potencial (MAT_POWER_LAW_PLASTICITY). La ecuación constitutiva que define al modelo es:

$$\sigma = \sigma_0 * \varepsilon^m$$

Siendo:

- ✓ m (coeficiente de endurecimiento)= 0.038305
- ✓ σ_0 (coeficiente de resistencia)= $1.5423 \cdot 10^8$

Además se ha añadido a este modelo una “*tarjeta de material*” extra para dotar a este modelo de ciertas propiedades. En particular se ha añadido una propiedad mediante la cual los elementos del núcleo, al alcanzar una deformación del 0,2%, son eliminados para evitar un problema de índole numérico.

En la figura 4.3.1.1 se puede observar el mallado utilizado para el núcleo. En total el núcleo está formado por 31.616 elementos (color rojo) con un espesor de 60 μm y por 15.808 elementos (color azul) con un espesor de 120 μm . La razón de tener unos elementos con un espesor doble ya se ha explicado en anteriores capítulos, donde se describe la fabricación de un núcleo tipo honeycomb. Los elementos que componen el núcleo están formados por 4 nodos, pues son elementos tipo placa (Shell).

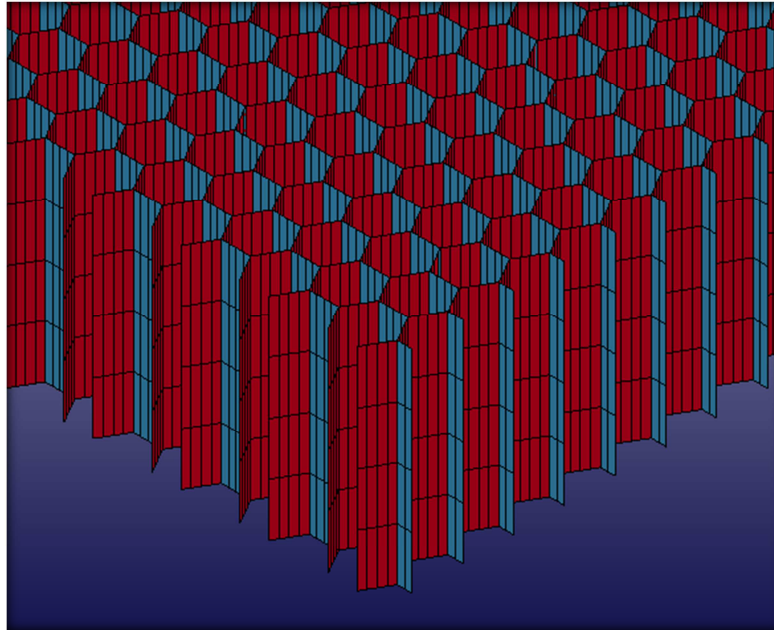


Figura 4.3.1.1: Detalle del mallado del núcleo

4.3.2. Pielés

El material que forma que las pieles es de fibra de carbono (AGP-193-PW) reforzada con una matriz de resina epoxi. El modelo escogido para representar las propiedades de este material compuesto, ha sido un modelo pensado para materiales compuestos con laminados unidireccionales, tipo tejido, o laminados completos. Esta especialmente pensado para usarse con elementos Shell o Thick Shell (Tshell), por lo que se adapta perfectamente a las características de las pieles del modelo. Este modelo representa un material elástico hasta la rotura (MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC).

Las propiedades físicas y mecánicas (a 25°C) de las láminas son:

- Densidad: $1.570 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$
- Espesor de la lámina: 0.2mm
- Coeficiente de Poisson ν_{ba} : 0.22
- Módulo de cizalladura ab , G_{ab} : $5 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- Módulo de cizalladura bc , G_{bc} : $4.500 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- Módulo de cizalladura ca , G_{ca} : $4.500 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- Resistencia a tracción en dirección longitudinal, X_t : $8.8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- Resistencia a tracción en dirección transversal, Y_t : $8.8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- Resistencia a compresión en dirección longitudinal, X_c : $8.8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- Resistencia a compresión en dirección trasversal, Y_c : $8.8 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- Módulo de Young dirección longitudinal, E_1 : $6.800 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
- Módulo de Young dirección transversal, E_2 : $6.800 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
- Resistencia a cortadura, S : $8.4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$

Cada piel está compuesta por un total de 125.000 elementos hexaédricos (8 nodos). Como ya se ha mencionado cada piel está simulada numéricamente como dos pieles, para poder estudiar la delaminación que se produce por el impacto del proyectil sin tener que definir el laminado entero. Por lo tanto cada una de las dos semi-pieles que forman las pieles tienen 62.500 elementos (250x250). Con el fin de ahorrar tiempo computacional se ha hecho un análisis de sensibilidad para hallar el número de elementos óptimos que permita obtener unos resultados con la suficiente precisión. En la figura 4.3.2.1 se muestra una parte del mallado de las pieles.

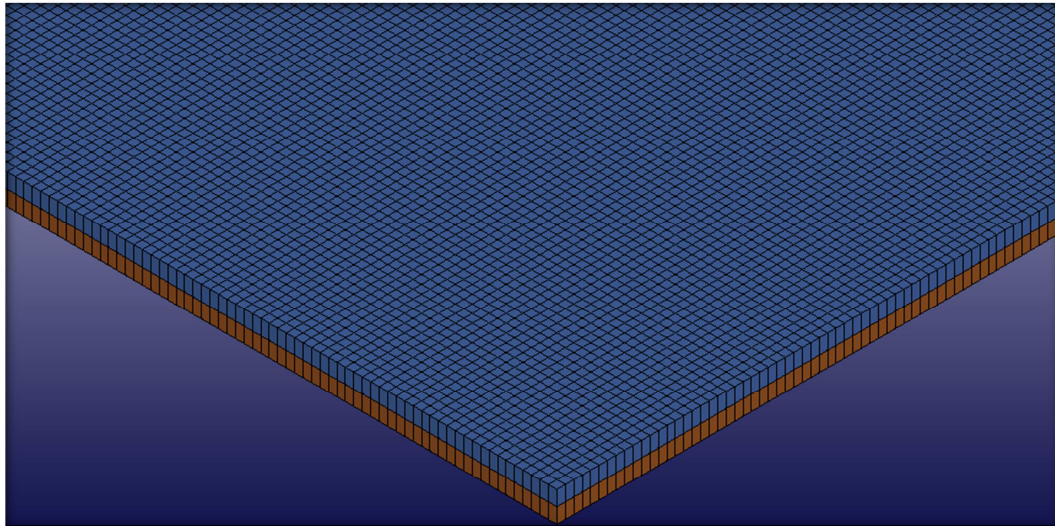


Figura 4.3.2.1: Detalle del mallado de las pieles

4.3.3. Proyectil

El material del proyectil esférico que se utiliza en este proyecto es el acero. El modelo escogido para simular el material usado es un modelo de cuerpo rígido, de forma que se evita cualquier deformación en la esfera.

Las propiedades mecánicas del acero son:

- ✓ Densidad: $7.850 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$
- ✓ Módulo de Young: $2.1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$
- ✓ Coeficiente de Poisson: 0.30

Para el mallado del proyectil se han utilizado 1.512 elementos hexaédricos. Puesto que el proyectil no se va a deformar plásticamente, con este número de elementos se obtiene una buena interacción de la esfera con el panel. En la figura 4.3.3.1 se muestra el mallado de la esfera.

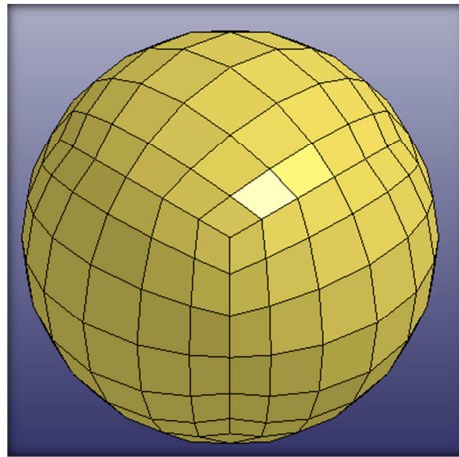


Figura 4.3.3.1: Mallado del proyectil.

4.4. CONDICIONES DE CONTORNO Y CONTACTOS

4.4.1. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han establecido son un empotramiento en cada uno de los lados del panel, impidiendo cualquier tipo de desplazamiento y rotación en todos los nodos a lo largo de los laterales del panel. En la figura 4.4.1 se muestran los nodos empotrados a los que se les ha aplicado las condiciones de contorno.

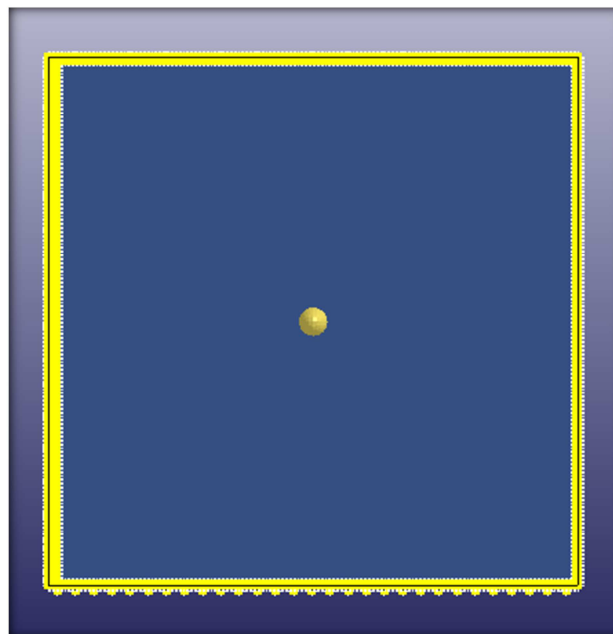


Figura 4.4.1: Empotramiento de los laterales del panel sándwich.

El esfuerzo al que se verá sometido el panel sándwich está definido por la velocidad de impacto asignada al proyectil.

4.4.2. Contactos

Una vez definida la geometría, el mallado, el material, y el resto de propiedades de cada una de las partes del modelo numérico, es necesario definir los contactos que tendrán lugar durante la simulación.

- **Proyectil – Panel Sándwich**

Se define un contacto entre proyectil y todo el panel sándwich. El contacto definido es un contacto entre los elementos del proyectil esférico y cada uno de los elementos del panel que entra en contacto con el proyectil. Para ello se crea un conjunto de elementos para delimitar la zona de impacto y ahorrar tiempo de computación, definiéndose de esta forma el contacto entre el mencionado conjunto de elementos (pieles y núcleo) y los elementos de la esfera.

- **Proyectil – Núcleo Honeycomb**

Como en el impacto el proyectil penetra de manera perpendicular al vector normal de los elementos del núcleo, en ocasiones el contacto entre los elementos de la esfera y los elementos del núcleo no se producía de manera perfecta, y hacía que en un primer momento el proyectil atravesase el núcleo sin llegar a contactar. Para solucionar este problema se añade un contacto entre los elementos que componen el proyectil y los nodos que forman la zona de impacto antes definida.

- **Contacto Entre Pieles**

Con el fin de modelar la delaminación de las pieles se ha incluido una interacción cohesiva entre las superficies en contacto de éstas.

- **Piel – Núcleo Honeycomb**

Para el contacto entre las pieles y el núcleo de honeycomb, se crea un contacto entre los elementos de la superficie en contacto de las pieles y los nodos en contacto del núcleo. Las interacciones se establecen de tipo “tie” para definir la unión entre la piel y el núcleo.

5. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

Para validar el modelo numérico empleado se utilizarán (como ya se ha mencionado anteriormente) los datos experimentales obtenidos y recogidos por Brenda Buitrago en su tesis ^[7].

5.1. VELOCIDAD RESIDUAL.

Para la validación del modelo numérico se usará como principal dato la velocidad residual del proyectil, buscando el límite balístico. En la gráfica que se observa en la figura 5.1.1. se recogen la curva con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales de alta velocidad, y los resultados obtenidos con el modelo numérico creado con software de modelización numérica LS-DYNA®. Las velocidades que se han escogido para el estudio de la velocidad residual han sido: 100, 160, 200, 300 y 500 m/s, aunque para la validación del modelo se han usado algunas velocidades extra para acercarse más al límite balístico y ajustar más la gráfica.

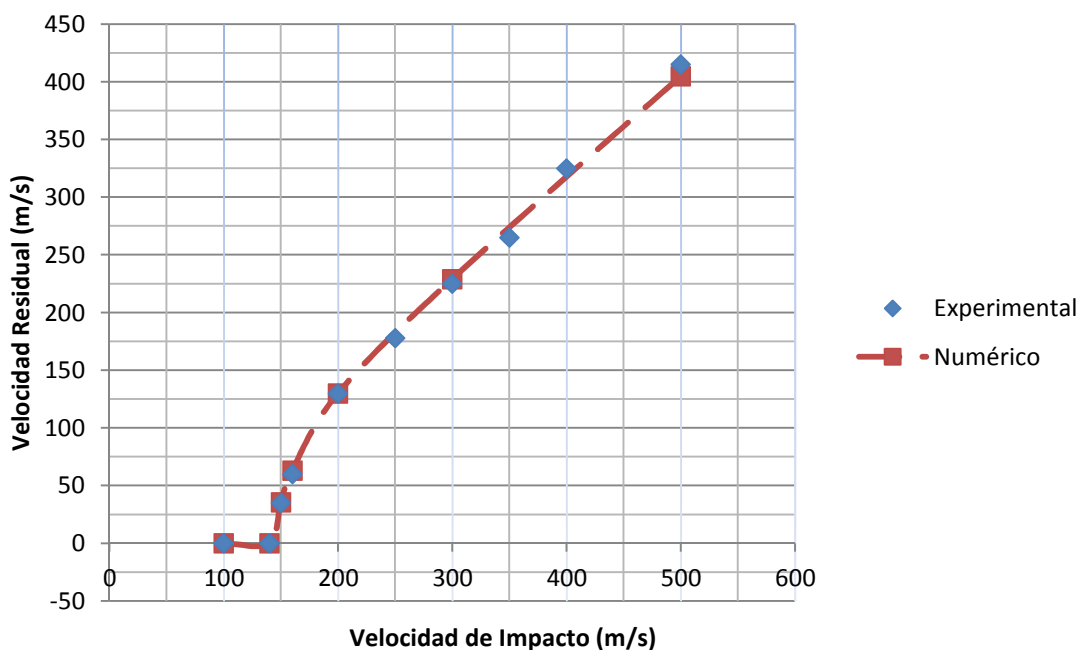


Figura 5.1.1: Gráfico que relaciona la velocidad de impacto con la velocidad residual.

LÍMITE BALÍSTICO MODELO NUMÉRICO	LÍMITE BALÍSTICO RESULTADOS EXPERIMENTALES
140 m/s	139±4 m/s

Como se observa en la tabla superior, el límite balístico coincide a la perfección con los resultados obtenidos experimentalmente. Fijándose en ambas curvas, se comprueba que siguen una misma tendencia y que la diferencia entre ambas es mínima. El error máximo obtenido entre los resultados es de un 5%, siendo el resto inferior al 3%. Por lo tanto, al obtener unos resultados con un error menor al 10%, se considera que el modelo numérico creado es válido y que sus resultados son fiables.

5.2. ENERGÍA ABSORBIDA.

Una vez validado el modelo, se puede emplear para obtener información que de manera experimental sería imposible. Una de las cosas más interesantes a estudiar es de qué manera influye el impacto en cada una de las partes del panel sándwich.

Para estudiar la energía que absorbe cada una de las partes, se han utilizado las siguientes velocidades de impacto: 150, 160, 200, 300 y 500 m/s. De esta forma se podrá observar cómo influye cada parte y la relación que tiene con la velocidad de impacto. La variable a estudiar será la energía cinética del proyectil. Puesto que la energía perdida de un cuerpo es igual a la energía que absorbe el otro cuerpo en contacto, se puede obtener la energía que absorbe cada parte del panel sándwich.

De entre las velocidades de impacto estudiadas, se hará hincapié en las velocidades de 160 y 300 m/s, para estudiar los dos comportamientos diferentes obtenidos.

▪ Velocidad de impacto = 160 m/s

En la figura 5.2.1 se puede observar una gráfica que muestra la evolución de la energía cinética del proyectil a lo largo del tiempo cuando impacta a 160 m/s, velocidad muy próxima al límite balístico.

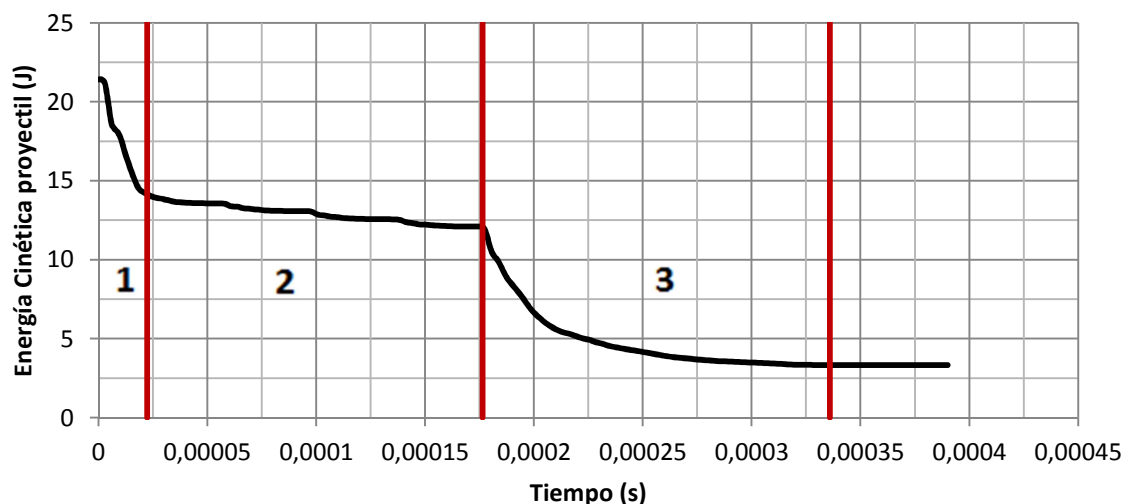


Figura 5.2.1: Energía cinética del proyectil cuando $V_{\text{impacto}}=160$ m/s

La energía total que pierde el proyectil al atravesar el panel sándwich es de 18,09 Julios. La gráfica está dividida en tres zonas siendo (empezando por la izquierda):

- ✓ **Primera zona:** piel superior.
- ✓ **Segunda zona:** honeycomb.
- ✓ **Tercera zona:** piel inferior.

Sobre el total de energía cinética absorbida por el panel, el porcentaje que absorbe cada parte es:

- ✓ **Piel superior:** 41%.
- ✓ **Núcleo:** 10,5%.
- ✓ **Piel inferior:** 48,5%.

La piel superior, gracias a la protección que le confiere el núcleo, tiene una mayor rigidez. El honeycomb no permite que la piel flecte, lo que se hace que el efecto a causa del impacto sea muy localizado y que el proyectil al perforar la piel produzca un taladro.

En la piel inferior, el efecto es más global. Cuando el proyectil impacta, lo hace a una velocidad de 120 m/s, por lo que ya de primeras carece de la misma energía que antes para perforar la piel. Además, al no tener la protección del honeycomb, la piel inferior no tiene tanta rigidez, produciéndose una gran flexión en el laminado al impactar el proyectil, como muestra la figura 5.2.2. Al flectar tanto, se produce una gran rotura, nada parecida al taladro de la piel superior. Con todo esto, el tiempo de contacto entre el proyectil y la piel aumenta considerablemente ($159\mu\text{s}$), y por consiguiente el tiempo durante el cual la piel inferior absorbe energía cinética. Toda esta flexión y rotura de la piel se traduce en energía absorbida, pudiendo ser ésta la razón por la que la piel inferior absorbe en este caso más energía que la piel superior.

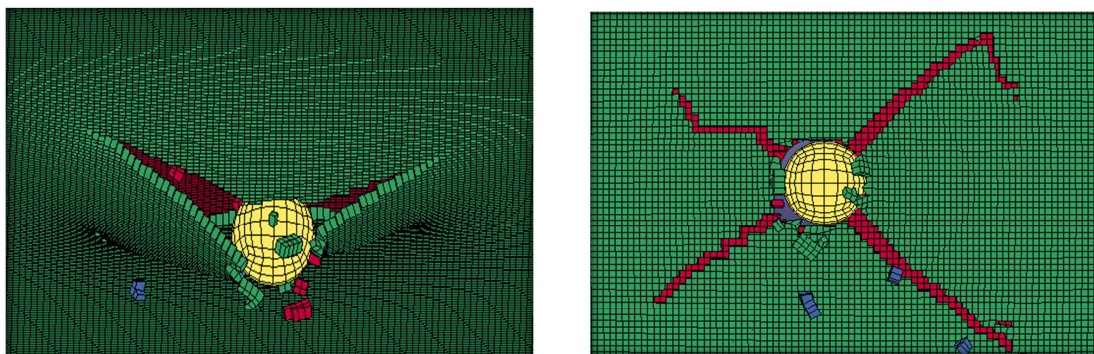


Figura 5.2.2: Detalle del impacto del proyectil con la piel inferior cuando $V_{\text{impacto}}=160 \text{ m/s}$.

- Velocidad de impacto = 300 m/s

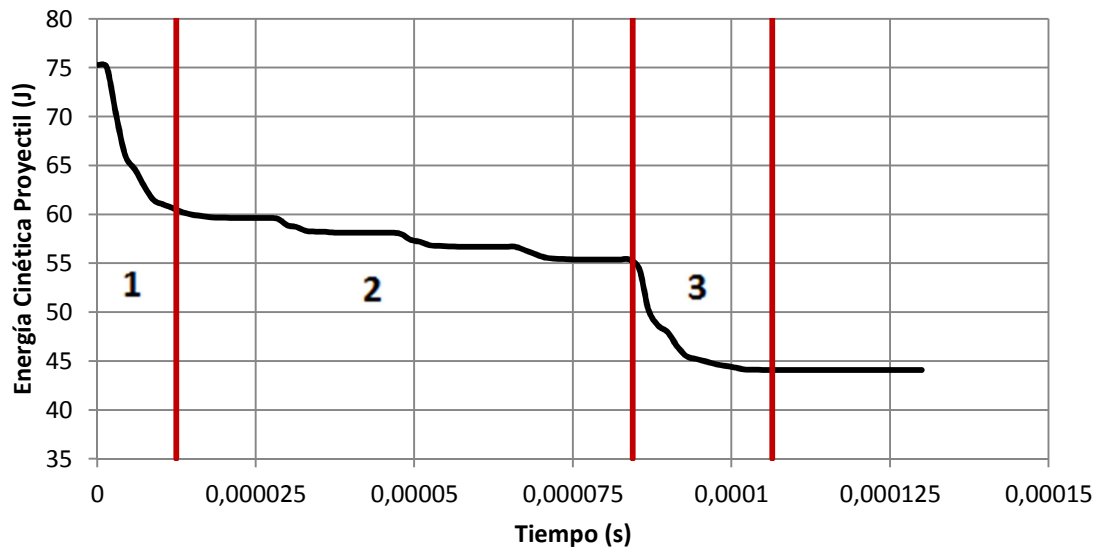


Figura 5.2.3: Energía cinética del proyectil cuando $V_{\text{impacto}}=300$ m/s.

A una velocidad de impacto de 300 m/s, ya bastante alejada del límite balístico, se observa una tendencia de los resultados diferente, siendo ahora la piel superior la que mayor energía absorbe. En este caso la energía total absorbida es 31,2 J. A medida que aumenta la velocidad de impacto lo hace también la energía absorbida. Los resultados que se obtienen de la gráfica de la figura 5.2.3 son:

- ✓ **Piel superior:** 43,54%.
- ✓ **Núcleo:** 16,32%.
- ✓ **Piel inferior:** 40,14%

La piel superior muestra el mismo comportamiento que cuando el proyectil impacta a 160 m/s. Como en el caso anterior, el honeycomb aumenta la rigidez de la piel al evitar que esta flexe. Se produce nuevamente un impacto local, que provoca que el proyectil atraviese la piel como un taladro.

En la piel inferior se observa el mismo efecto, un impacto en forma de taladro, muy localizado. En este caso el proyectil, que impacta con una velocidad de 257 m/s, no crea demasiada flexión en el laminado, siendo inapreciable, tal y como se muestra en la figura 5.2.4. En este caso, el tiempo de contacto entre proyectil y piel es de 22 μ s, mucho menor que en el anterior.

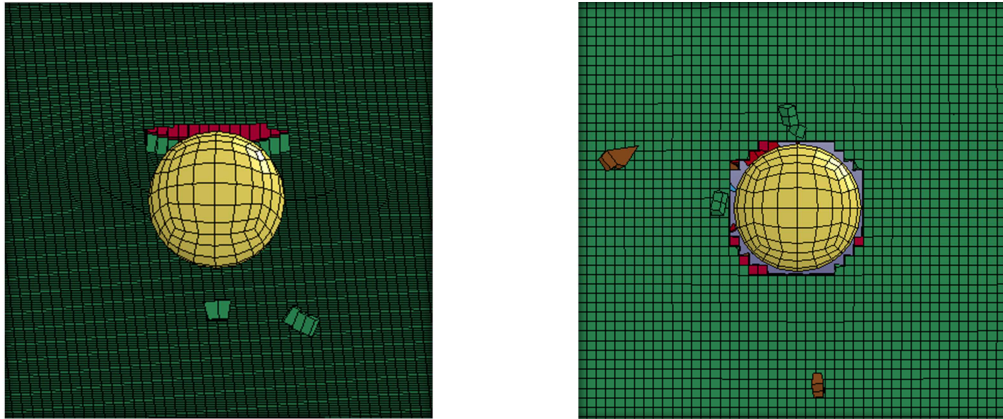


Figura 5.2.8: Detalle del impacto del proyectil con la piel inferior cuando $V_{\text{impacto}}=300$ m/s.

Siendo el efecto producido por el impacto del proyectil muy similar en ambas pieles y causando el mismo taladro por rotura, y siendo la ecuación de la energía cinética:

$$T = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Se podría explicar la mayor absorción de energía por parte de la piel superior a partir de la diferencia de velocidades. El proyectil impacta contra la primera piel a 300 m/s, saliendo a 269 m/s. Por lo tanto la energía cinética perdida por el proyectil es:

$$T = \frac{1}{2} * m * (V_{\text{imp}}^2 - V_1^2) = \frac{m}{2} * 17639$$

En cambio sobre la piel inferior el proyectil impacta con una velocidad de 257 m/s, saliendo finalmente con una velocidad residual de 229,6 m/s. En este caso la energía cinética que pierde el proyectil es:

$$T = \frac{1}{2} * m * (V_2^2 - V_{\text{residual}}^2) = \frac{m}{2} * 13332,84$$

Se aprecia claramente como la energía cinética que pierde el proyectil al atravesar la primera piel, y que por tanto es absorbido por ésta, es mayor que la energía que pierde al atravesar la piel inferior.

▪ Conclusión

La gráfica de la figura 5.2.6 muestra como varía el comportamiento de cada una de las pieles y del núcleo en función de la velocidad de impacto.

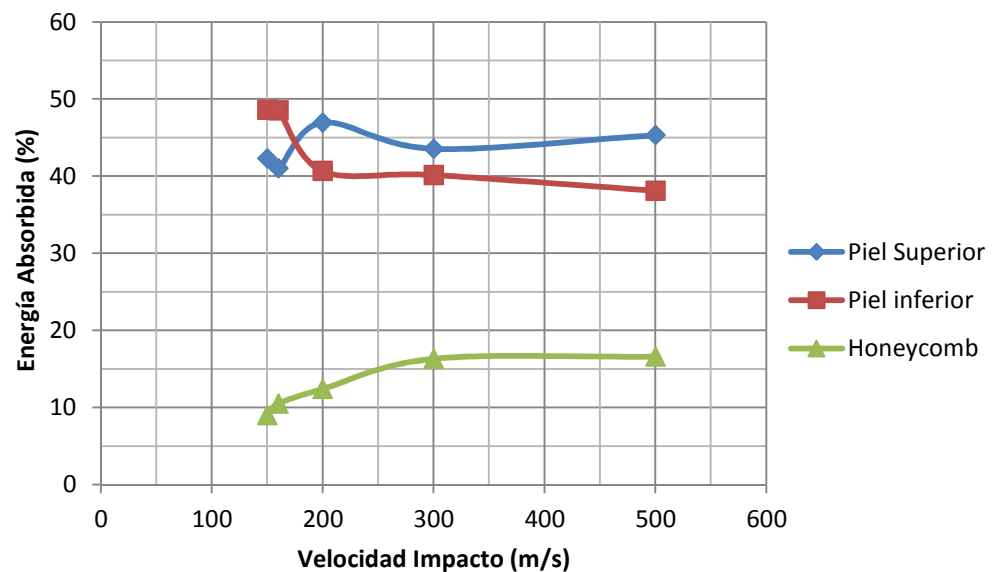


Figura 5.2.6: Gráfica que relaciona la energía absorbida por cada una de las partes con la velocidad de impacto.

En general, la piel superior es la máxima responsable de la absorción de la energía del proyectil. A medida que la velocidad de impacto aumenta, los porcentajes de absorción de energía de cada parte se van estabilizando. Se podría dar unos valores medios aproximados, absorbiendo la piel superior alrededor del 45% de la energía del proyectil, mientras que la piel inferior y el núcleo de honeycomb absorben el 40% y 15% respectivamente.

Sin embargo, como se acaba de ver en los casos de 160 y 300 m/s, cerca del límite balístico existe un cambio en este comportamiento. Cerca del límite balístico la piel inferior es la principal protagonista en la absorción de energía.

Uno de los posibles razonamientos para este fenómeno podría ser que cuando la velocidad es muy cercana al límite balístico, el mecanismo principal de absorción de energía en la piel inferior está definido por la rotura y la flexión del laminado. En cambio el mecanismo de absorción principal en la piel superior parece ser la aceleración del plug, siendo la energía absorbida de esta forma menor que en la piel inferior. En cambio, cuando la velocidad se aleja del límite balístico, la piel inferior empieza a presentar el mismo comportamiento que la piel superior, pero puesto que el proyectil impacta con menos velocidad, la energía absorbida por ésta es menor que la energía absorbida por la primera piel.

5.3. DELAMINACIÓN.

Otro de los factores importantes a estudiar, una vez validado el modelo, es la delaminación de las láminas de fibra de carbono con matriz de resina epoxi. Como ya se ha comentado en el capítulo 4, en el que se describe el modelo numérico, las pieles han sido creadas en dos partes

para poder estudiar la delaminación. Se estudia a continuación la delaminación que sufre la piel superior y la piel inferior a varias velocidades de impacto (100, 160, 200, 300 y 500 m/s).

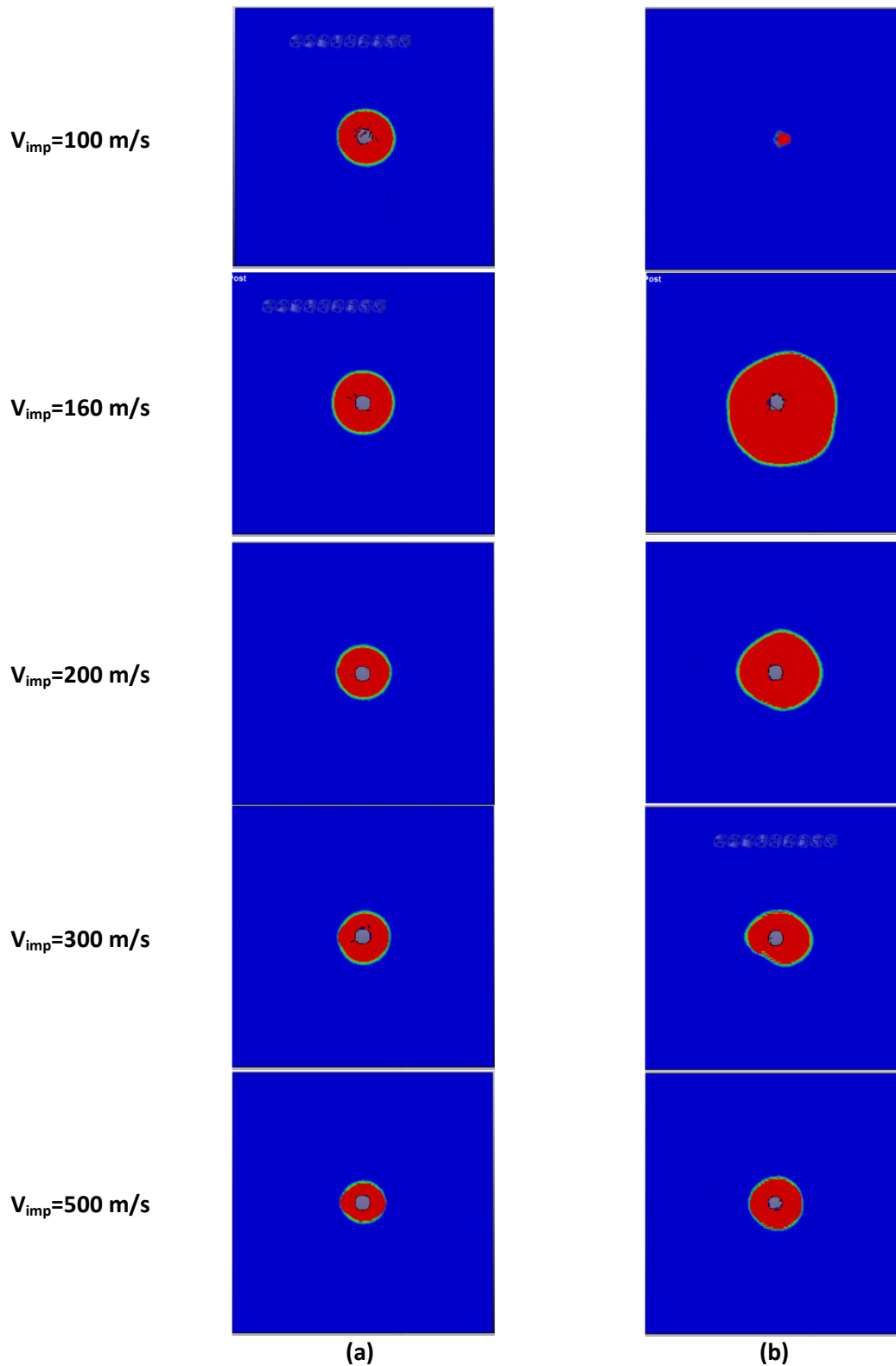


Figura 5.3.1: Delaminación en la Piel Superior (a), y la Piel Inferior (b) a diferentes velocidades de impacto.

Lo que muestra la figura 5.3.1 es la evolución del área delaminada de cada piel a medida que aumenta la velocidad de impacto. La zona donde se ha producido delaminación es la que está indicada con color rojo.

A 100 m/s (velocidad inferior al límite balístico) el proyectil consigue perforar la piel superior, pero cuando impacta con la piel inferior carece de la energía suficiente para provocar siquiera una pequeña rotura, aunque sí que se aprecia una pequeña zona afectada.

Cuando la velocidad de impacto es de 160 m/s se obtienen unos resultados mucho más interesantes. Las imágenes que reflejan sobre la delaminación muestran lo mismo que lo explicado en el apartado de absorción de energía. En la piel superior se observa un efecto más local, mientras que en la piel inferior se obtiene un gran área delaminada, siendo el efecto provocado por el impacto más global.

A medida que la velocidad aumenta, el impacto en la piel inferior se vuelve más localizado, concentrándose el área delaminada alrededor del taladro creado por la perforación del proyectil.

Cuando la velocidad de impacto es 500 m/s, los efectos en ambas pieles son muy localizados. Cuando el proyectil impacta con la piel inferior, lo hace a una velocidad de 441 m/s, provocando un área delaminada muy similar a la obtenida en la piel superior a la velocidad de impacto de 200 m/s, a pesar de ser mucha menor velocidad. Esto se explica por lo ya expuesto en el caso de $V_{\text{impacto}} = 160$ m/s. La delaminación producida en la piel inferior es siempre mayor puesto que carece de la protección del honeycomb, y por lo tanto no es tan rígida como la piel superior.

La zona afectada disminuye al mismo tiempo que la velocidad de impacto aumenta, pues cuanto más energía cinética tiene el proyectil, el impacto que provoca tiene un efecto cada vez más localizado. Se observa incluso como el área delaminada va alcanzando un valor asintótico, que se aprecia mucho mejor en la gráfica de la figura 5.3.2

Otro de los efectos que se observa es que cuando la velocidad es inferior al límite balístico, cuanto mayor es la velocidad, mayor es el área delaminada. En cambio, una vez sobrepasamos el límite balístico el comportamiento se invierte, siendo más reducida la zona afectada cuanto más elevada es la velocidad de impacto. Esto queda muy bien reflejado en la gráfica, apreciándose en ambas pieles una zona donde el valor es máximo, la cual se encuentra a velocidades muy próximas al límite balístico.

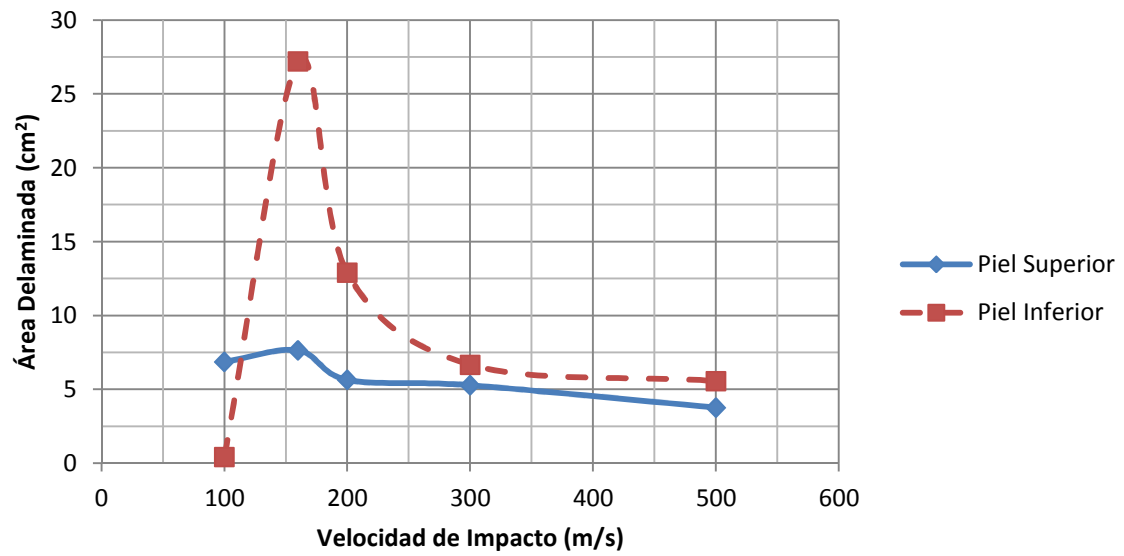


Figura 5.3.2: Gráfica que relaciona la velocidad de impacto con el área delaminada.

6. VARIACION DE PARÁMETROS.

El siguiente capítulo analiza los resultados obtenidos al variar diferentes parámetros del núcleo:

- Altura del núcleo de honeycomb.
- Espesor del núcleo.
- Tamaño de las celdas hexagonales que componen el honeycomb.
- Trayectoria de impacto del proyectil (0° y 45°).

En los siguientes apartados se estudia cómo influyen los parámetros mencionados en la velocidad residual del proyectil. Cada parámetro se estudia con un impacto del proyectil, y un ángulo de 0° y 45° respecto del vector normal de las pieles. Así se podrá estudiar mejor la influencia del núcleo en la velocidad residual.

Como se describe en el capítulo 3, los parámetros que definen el modelo experimental de referencia utilizado para la validación de los resultados son:

- Altura del núcleo (H) = 20 cm.
- Espesor de las celdas del núcleo (E) = 60 μm .
- Tamaño de las celdas del honeycomb (D) = 4,8mm (3/16").

6.1. ALTURA.

Uno de los parámetros a analizar será la altura del núcleo, utilizando unas alturas de honeycomb de 10 y 30 cm, además de los 20 cm usados en el modelo base. Se estudia la velocidad residual del proyectil, buscando en cada caso el límite balístico, la energía absorbida por el núcleo y la delaminación producida por el impacto.

6.1.1. Velocidad residual

▪ Ángulo de impacto 0°

En la gráfica que se muestra en la figura 6.1.1.1, se observan las diferentes curvas obtenidas al variar la altura del núcleo de honeycomb, utilizando para el estudio unas velocidades de impacto de 100, 150, 200, 300 y 500 m/s.

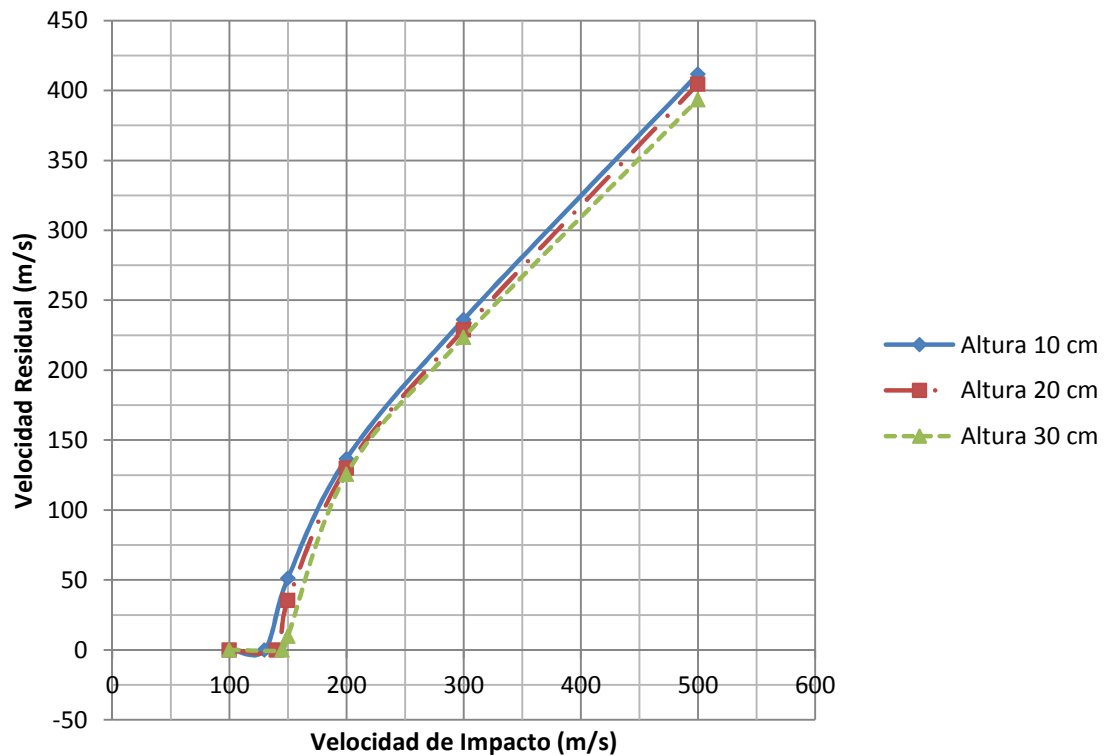


Figura 6.1.1.1: Gráfica que muestra la evolución de la velocidad residual al aumentar la altura del núcleo del panel sándwich con un ángulo de impacto de 0°.

LÍMITE BALÍSTICO H=10 CM	LÍMITE BALÍSTICO H=20 CM	LÍMITE BALÍSTICO H= 30 CM
130 m/s	140 m/s	145 m/s

Tabla 6.1.1.1: Límite balístico de cada panel sándwich cuando el ángulo de impacto es 0°.

Como era de esperar, las diferencias al variar la altura del núcleo no son muy significativas, pues el honeycomb absorbe únicamente alrededor de un 15% de la energía del proyectil. Aun así se puede observar como la variación de altura del núcleo puede situar el límite balístico desde aproximadamente 130 m/s cuando el núcleo tiene una altura de 10 cm, hasta un valor de unos 145 m/s con una altura de 30 cm. Esto es debido a que cerca del límite balístico es donde se encuentran las mayores diferencias, pues como se aprecia en las curvas, es la zona donde la pendiente es más pronunciada y por lo tanto donde un pequeño cambio de velocidad tiene mayor repercusión.

En cambio a elevadas velocidades, las diferencias son pequeñas, aunque se puede seguir viendo como a medida que la altura del núcleo aumenta, las velocidades residuales se reducen. Es decir, a mayor masa por parte del núcleo menor es la velocidad residual.

▪ Ángulo de impacto 45°

En este caso se estudia lo mismo que en el anterior, solo que ahora el proyectil no impacta de manera perpendicular al plano de la piel, sino que lo hace con un ángulo de 45°. En este caso, el papel que juega el honeycomb es más determinante, pues el contacto entre el proyectil y el núcleo es mayor. En la figura 6.1.1.2 se muestra cómo varía la velocidad residual a medida que aumenta la altura del núcleo.

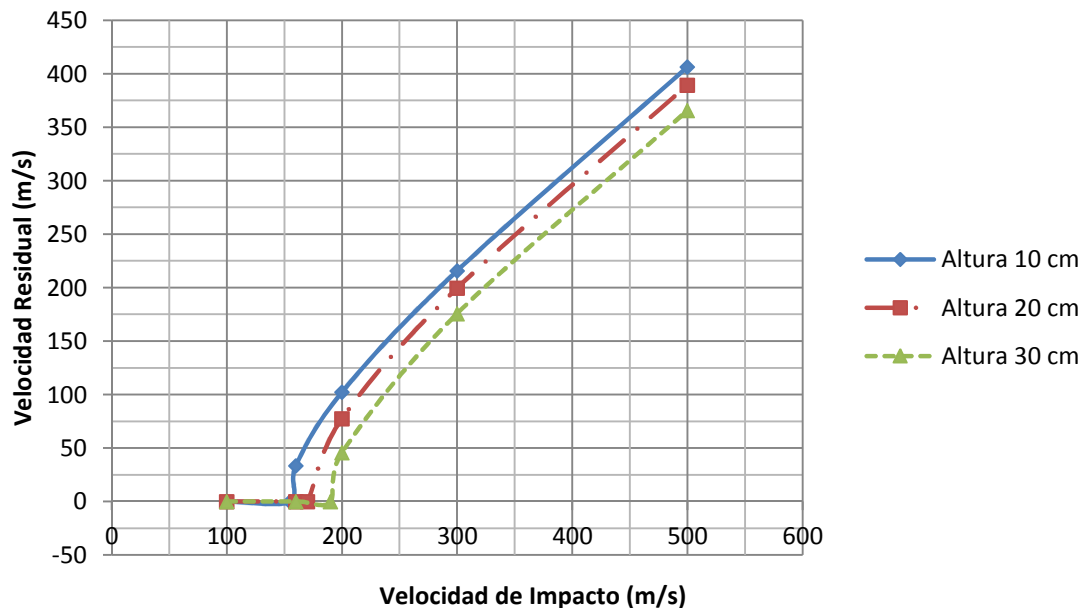


Figura 6.1.1.2: Gráfica que muestra la evolución de la velocidad residual al aumentar la altura del núcleo del panel sándwich con un ángulo de impacto de 45°

LÍMITE BALÍSTICO H=10 CM	LÍMITE BALÍSTICO H=20 CM	LÍMITE BALÍSTICO H= 30 CM
155 m/s	170 m/s	190 m/s

Tabla 6.1.1.2: Límite balístico de cada panel sándwich cuando el ángulo de impacto es 45°.

Las diferencias al aumentar en ángulo de impacto son mucho más apreciables. El núcleo ahora tiene una mayor repercusión en los resultados. Al impactar el proyectil con un ángulo de 45°, es de esperar que el límite balístico aumente de manera considerable, pues no solo está más tiempo en contacto con el núcleo, sino que sobre todo aumenta el tiempo de contacto entre el proyectil y las pieles, lo que se traduce en una mayor absorción de energía cinética del proyectil. En la figura 6.1.1.3 se muestra como la variación del límite balístico es mucho mayor en el caso en que el ángulo de impacto es de 45°, pues la importancia del núcleo es mayor.

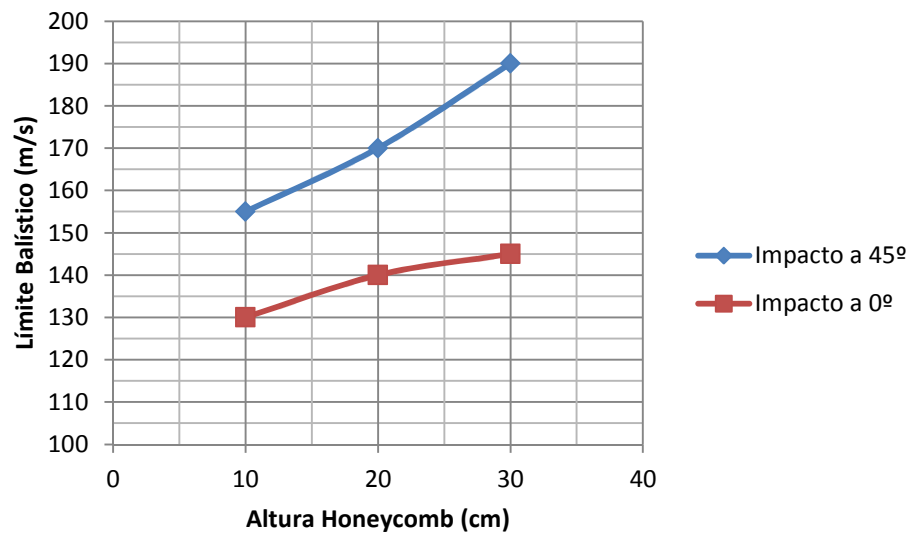


Figura 6.1.1.3: Gráfica que muestra la evolución del límite balístico al aumentar la altura del núcleo del panel sándwich, según el ángulo de impacto del proyectil.

De la gráfica se puede obtener algo más de información. Se observa como al incrementar el ángulo de impacto, la tendencia de la curva cambia. Cuanta mayor masa tiene el núcleo, mejor es la protección balística. Cuando el proyectil tiene una trayectoria de 0°, la curva que representa la gráfica de la figura 6.1.1.3 muestra como al aumentar la altura, la pendiente va disminuyendo. En cambio, la curva tiene un comportamiento diferente cuando el ángulo de impacto es de 45°, siendo mayor la pendiente a medida que aumenta la altura.

6.1.2. Absorción de energía

Según las conclusiones sacadas en el capítulo 5.2, cuando la altura del núcleo es de 20 cm, el honeycomb absorbe alrededor del 15% de la energía, mientras que las pieles superior e inferior absorben un 45 y 40% respectivamente. Si se estudia la absorción de energía en los casos en que se varía la altura, se obtienen unos resultados diferentes.

La gráfica de la figura 6.1.2.1 muestra la cantidad de energía cinética que es absorbida por el honeycomb según las diferentes alturas y según el ángulo de impacto del proyectil, cuando la velocidad de impacto del proyectil es de 300 m/s. La razón de elegir esta velocidad de impacto es que está lo suficientemente alejada del límite balístico, y por lo tanto presenta unos valores que se mantendrán más o menos constantes a partir de esta velocidad.

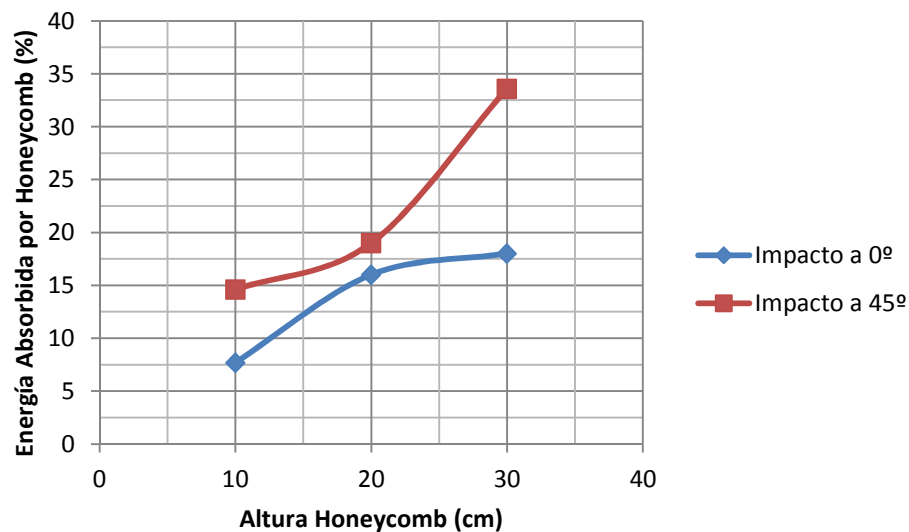


Figura 6.1.2.1: Energía absorbida por el núcleo en función de la altura de este, para los ángulos de impacto del proyectil de 0° y 45°, a $V_{\text{impacto}}=300$ m/s.

Como se puede comprobar, no solo el porcentaje de energía absorbida por el núcleo es mayor al aumentar la altura del honeycomb, sino que al incrementar el ángulo de impacto del proyectil el núcleo gana mucha importancia, llegando a absorber un 33,6% cuando la altura es de 30 cm y el ángulo de impacto es de 45°. La piel superior sigue teniendo el mismo papel principal, pero en cambio, todo el porcentaje de más que absorbe el honeycomb, es absorbido de menos por la piel inferior, llegando a participar únicamente un 24,6% en el caso antes descrito cuando la altura es de 30 cm y el ángulo de impacto es 45°. En la imagen de la figura 6.1.2.2 se muestra un ejemplo de cómo el proyectil es frenado a causa del honeycomb, en el caso último mencionado. Es decir, que cuanto mayor es la masa del núcleo, mayor es la importancia de éste.

Un resultado interesante a comentar es la diferencia en la evolución de las curvas en cada caso al variar el ángulo de impacto del proyectil. Cuando el proyectil impacta de manera perpendicular sobre el panel, el mayor aumento de absorción de energía se observa al principio. A medida que se incrementa la altura del núcleo la pendiente de la curva va disminuyendo.

En cambio, al aumentar el ángulo de impacto a 45° , el comportamiento es el contrario, y cuanto mayor es la altura del núcleo mayor porcentaje de energía absorbe.

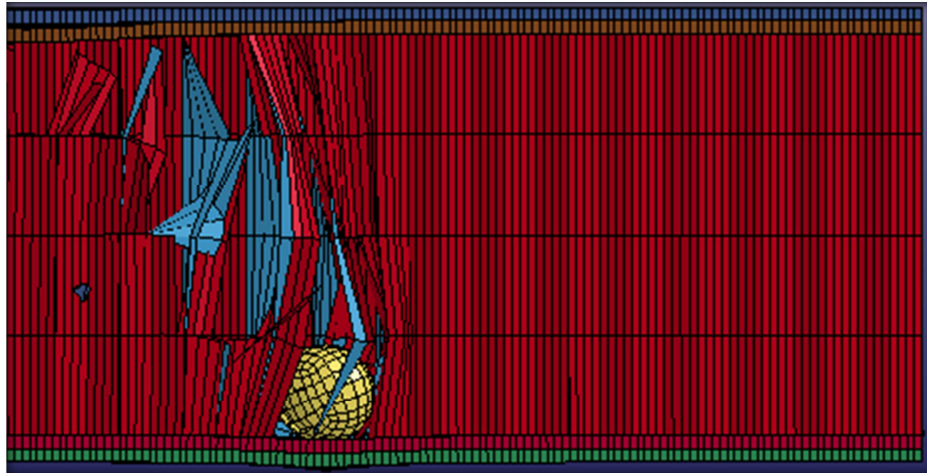


Figura 6.1.2.2: Detalle del proyectil atravesando el honeycomb cuando la velocidad de impacto es de 45° y la altura del núcleo es de 30 cm

6.1.3. Delaminación

En este caso se estudia cómo afecta la variación de la altura y la variación del ángulo de impacto del proyectil en la delaminación de las pieles. El objetivo es ver como a una misma velocidad de impacto los resultados varían en función de los parámetros a variar.

▪ Ángulo de impacto 0°

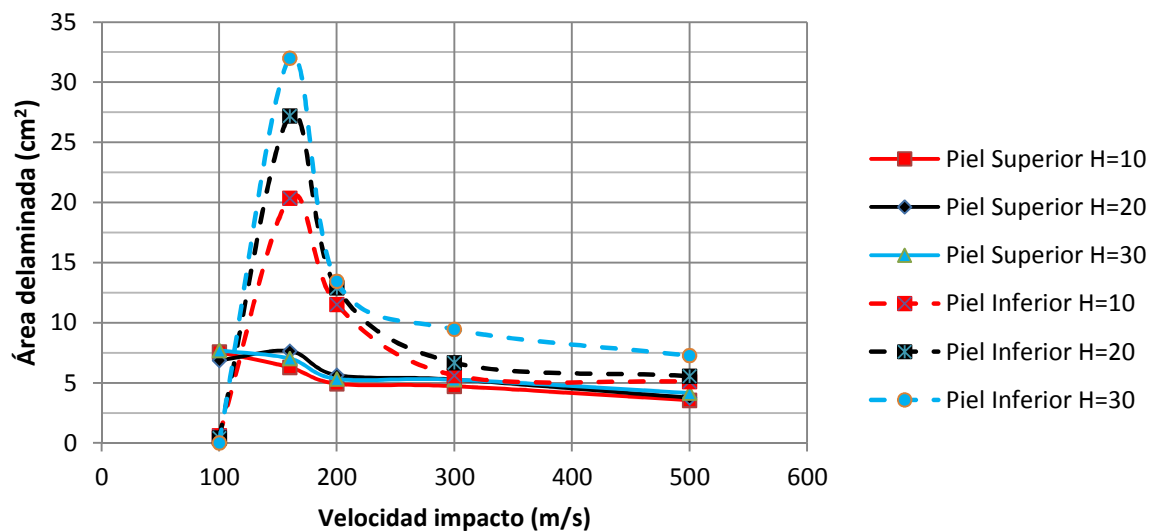


Figura 6.1.3.1: Gráfico que relaciona la delaminación que se produce en ambas pieles con la velocidad de impacto del proyectil. Ángulo de impacto = 0° .

La gráfica de la figura 6.1.3.1 muestra la evolución del área delaminada de cada piel en cada uno de los paneles estudiados al variar la velocidad de impacto.

La piel superior es que menos información aporta, puesto que la protección que le confiere el honeycomb en los tres casos es la misma. La evolución que muestran las tres curvas de la piel superior sigue la misma tendencia, incrementando el área delaminada desde 100 m/s hasta que se alcanza el límite balístico.

La geometría que presenta la zona afectada al impactar el proyectil es circular, como bien se aprecia en la figura 6.1.3.2.

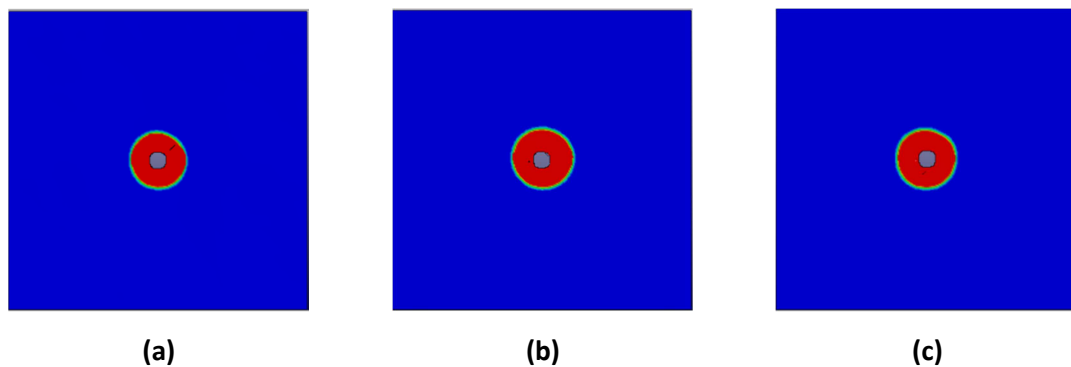


Figura 6.1.3.2: Delaminación de la piel superior cuando el proyectil impacta a 200 m/s con un ángulo de 0° al variar la altura del núcleo de 10 (a), 20 (b) a 30 cm (c).

La piel inferior en cambio sí que muestra diferencia muy apreciables. A mayor altura del honeycomb mayor es el área delaminada que sufre (efecto más global). Esto se observa principalmente el punto máximo, cercano al límite balístico. Las diferencias existentes en el valor de este límite en los tres casos causan que la zona donde los valores de la delaminación son máximos sean los que presenten las mayores diferencias.

A la velocidad de 100 m/s el proyectil consigue atravesar en los tres casos la primera piel, pues como se ha explicado, la piel superior presenta un comportamiento muy similar. En cambio, la piel inferior solo se ve afectada cuando la altura del honeycomb es de 10 y 20 cm. Cuando el honeycomb tiene 30 cm de altura, el proyectil sí que llega a impactar en la piel inferior, pero lo hace con insuficiente energía para producir siquiera una mínima área de delaminación (figuras 6.1.3.3 y figura 6.1.3.4).

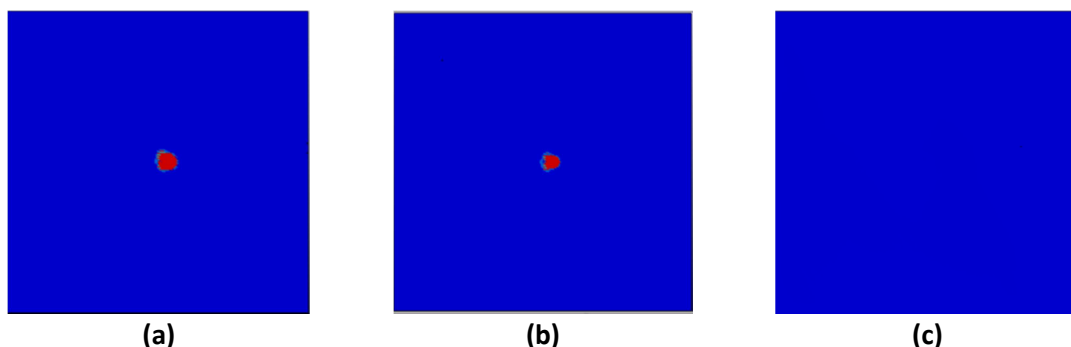


Figura 6.1.3.3: Delaminación de la piel inferior cuando el proyectil impacta a 100 m/s con un ángulo de 0° al variar la altura del núcleo de 10 (a), 20 (b) a 30 cm (c).

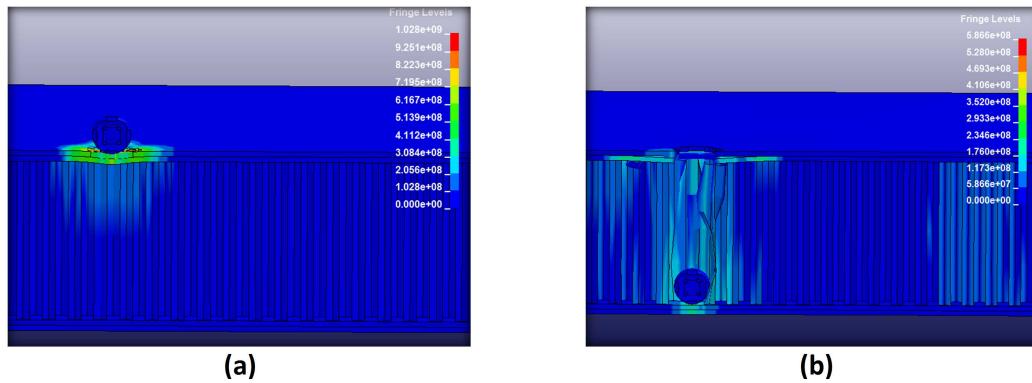


Figura 6.1.3.4: Tensiones causadas por el proyectil al impactar a 100 m/s con la piel superior (a) y con la piel inferior (b), cuando el núcleo tiene una altura de 30cm.

A partir de 300 m/s, todas las curvas empiezan a alcanzar un valor asintótico próximo a los 5 cm². La piel inferior muestra a partir de esta velocidad un efecto muy localizado, muy similar al efecto producido por el proyectil en la piel superior, aunque el área delaminada que presenta sigue siendo mayor que en la piel superior, pues carece de la rigidez de la piel superior al no tener debajo el núcleo de honeycomb como protección. La curva de la piel inferior cuando el núcleo mide 30 cm de altura es la que mayor delaminación muestra, y aunque parece que también tenderá a alcanzar ese valor asintótico, a 500 m/s la zona afectada sigue siendo relativamente mayor que en los otros dos casos.

▪ **Ángulo de impacto 45°**

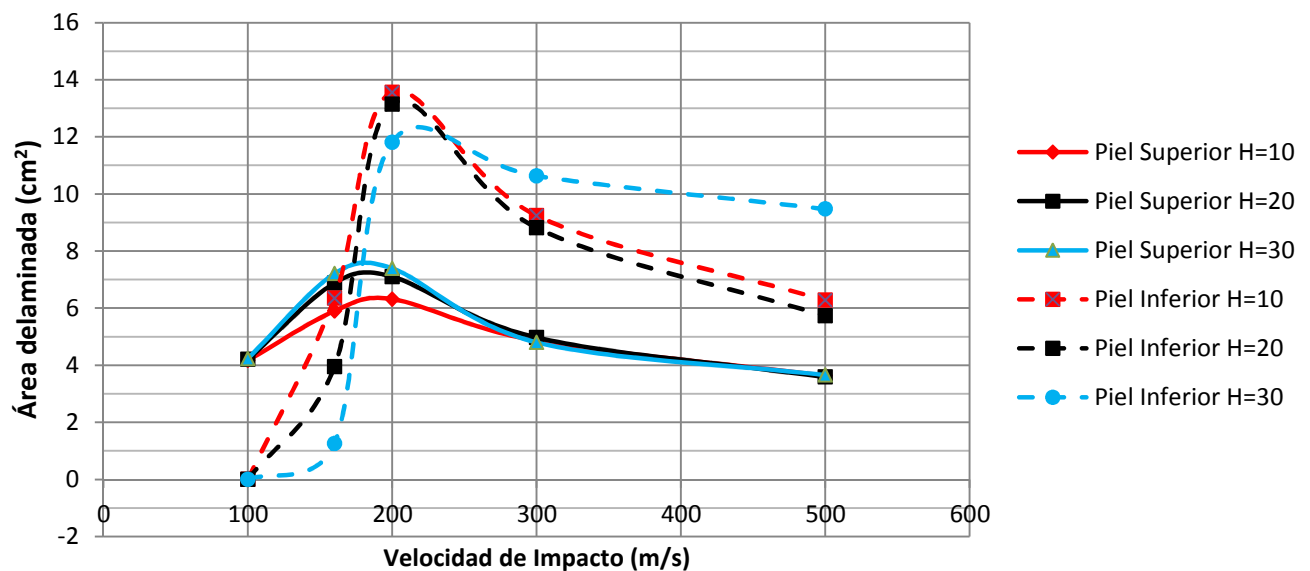


Figura 6.1.3.5: Grafico que relaciona la delaminación que se produce en ambas pieles con la velocidad de impacto del proyectil. Ángulo de impacto = 45°.

En este caso, la gráfica de la figura 6.1.3.5 muestra la delaminación de las pieles cuando el ángulo de impacto es de 45°.

Con un impacto de 45° , a 100 m/s el proyectil no consigue ni siquiera atravesar la primera piel. El tiempo de contacto entre la piel y el proyectil es mucho mayor en este caso, por lo que el proyectil necesita una mayor cantidad de energía para atravesar la piel, lo que se traduce en mayor velocidad. La figura 6.1.3.6 muestra el momento en el que el proyectil es frenado en su totalidad por la primera piel, no llegando ni siquiera a atravesar ésta.

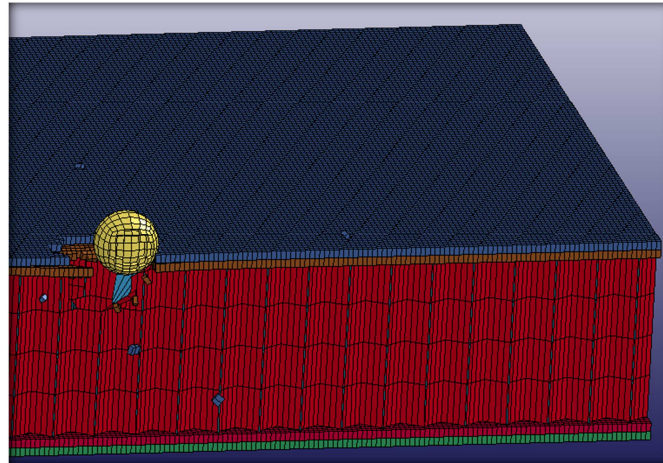


Figura 6.1.3.6: Imagen del proyectil en el momento en que es frenado por la piel superior.

La piel superior sigue presentando un comportamiento muy homogéneo, excepto en la zona donde la deaminación es máxima. En cambio, a medida que la velocidad aumenta esta diferencia desaparece, obteniendo el mismo área delaminada en las tres pieles superiores. Al tener el impacto una trayectoria de 45° , es posible que la altura adquiera algo de importancia, pues aunque las diferencias sean menos apreciables, la piel superior del panel con mayor altura muestra mayor delaminación que en el caso en que la altura es de 20 cm.

La geometría que presenta el área afectada al impactar el proyectil en este caso es elíptica a causa del ángulo de impacto, como se observa en la figura 6.1.3.7. Al tener una trayectoria de 45° , la delaminación no es homogénea en todas las direcciones, sino que es mayor en la dirección en la que se produce el impacto del proyectil.

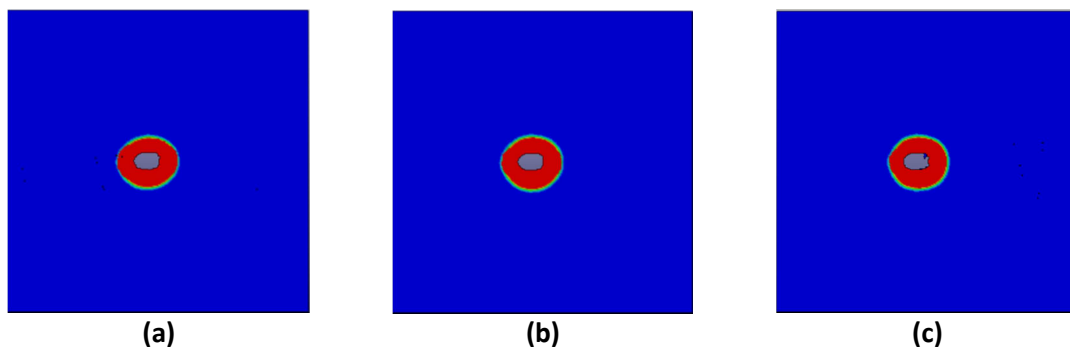


Figura 6.1.3.7: Delaminación de la piel superior cuando el proyectil impacta a 300 m/s con un ángulo de 45° al variar la altura del núcleo de 10 (a), 20 (b) a 30 cm (c).

Puesto que la velocidad con la que impacta el proyectil en la piel inferior es diferente en cada uno de los casos, es evidente que es donde más diferencias se van a observar. Si comparamos la delaminación que se produce con este ángulo de impacto con la delaminación obtenida al disparar el proyectil con una trayectoria de 0° , se comprueba en que en este caso la delaminación es mucho menor. Se observa principalmente en la zona donde los valores son máximos. La razón principal es que al no ser un impacto perpendicular, la flexión que sufre el laminado es considerablemente menor. El efecto que causa el proyectil es mucho más local. Esto se refleja en la figura 6.1.3.8, donde se muestra el área delaminada de la piel inferior cuando la velocidad es de 200 m/s. Se escoge la velocidad de 200 m/s, porque el límite balístico del modelo con 30 cm de altura de honeycomb es de 190 m/s.

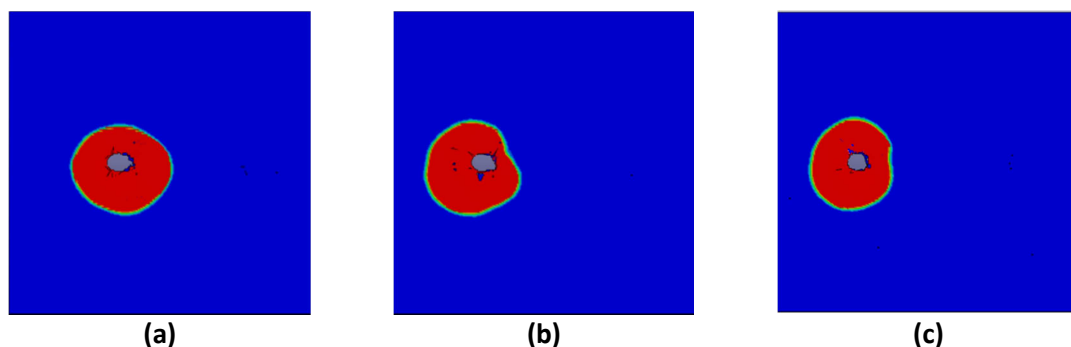


Figura 6.1.3.8: Delaminación de la piel inferior cuando el proyectil impacta a 200 m/s con un ángulo de 45° al variar la altura del núcleo de 10 (a), 20 (b) a 30 cm (c).

Cabe destacar la geometría que muestra la zona afectada en la piel inferior, evolucionando en la dirección de la trayectoria del proyectil.

De las curvas de la figura 6.1.3.4, la que representa el área delaminada de la piel inferior del panel con un núcleo de 30 cm de altura no presenta el comportamiento esperado. En principio a mayor cantidad de masa (mayor altura) mayor es la delaminación, pues el proyectil es frenado más y llega con una velocidad menor, lo que produce una zona afectada más grande. En cambio la zona máxima es inferior a la de los otros dos paneles. El límite balístico de este panel es de 190 m/s, mientras que los paneles con un núcleo de 10 y 20 cm presentan unos valores de 155 y 170 m/s. Parece ser que la curva del modelo de 30 cm de altura de honeycomb aún no ha alcanzado su máximo, y que por falta de datos la curva está mal representada.

De todas formas, cuando las velocidades aumentan el comportamiento se estabiliza y se obtienen los resultados esperados, siendo la delaminación obtenida en el panel de 34 cm de altura la mayor con diferencia, como se refleja en la figura 6.1.3.9. Una de las razones por la que éste panel presenta una delaminación mucho mayor que los otros dos en la piel inferior puede ser el ángulo de impacto con el que el proyectil llega a ésta. Cuanta más masa se encuentra el proyectil, más es frenado en la dirección longitudinal, perdiendo

ángulo y volviéndose cada vez más perpendicular. Por lo tanto, al ser un impacto con un menor ángulo y al tener menos velocidad, la delaminación que provoca es mayor. Esto puede observarse en la figur 6.1.3.10, donde se representa con una flecha la trayectoria del proyectil si el ángulo no variase.

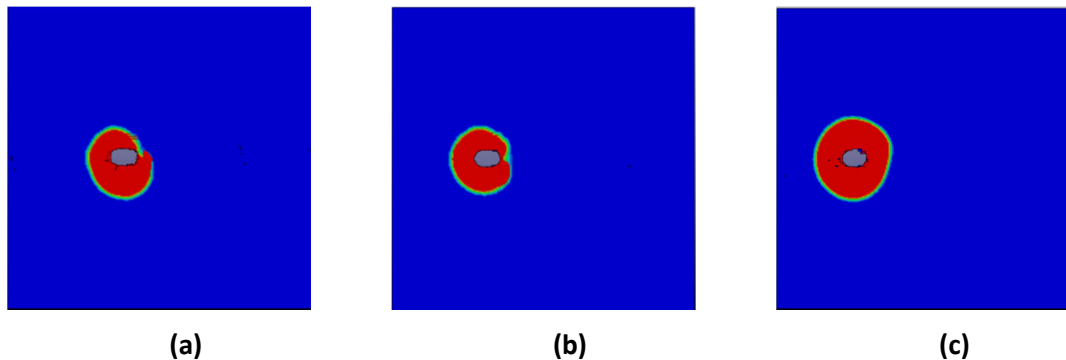


Figura 6.1.3.9: Delaminación de la piel inferior cuando el proyectil impacta a 500 m/s con un ángulo de 45° al variar la altura del núcleo de 10 (a), 20 (b) a 30 cm (c).

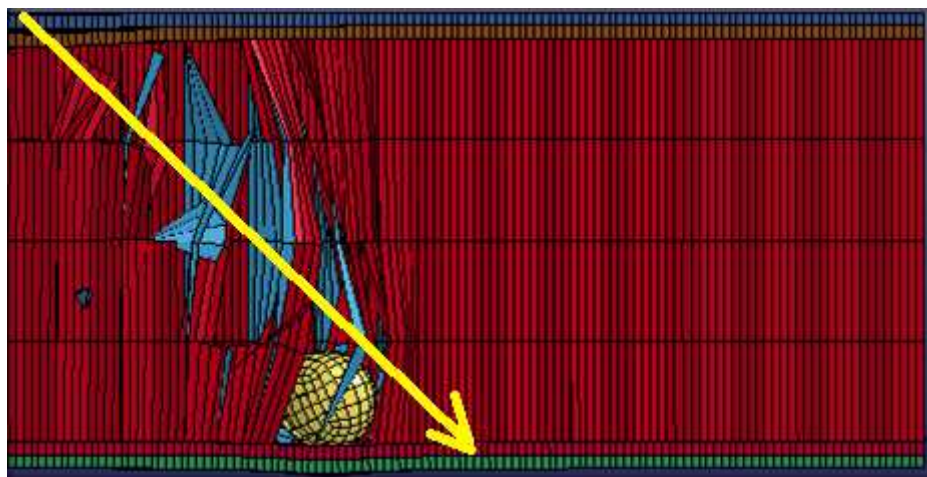


Figura 6.1.3.10: Detalle del proyectil atravesando el honeycomb cuando la velocidad de impacto es de 45° y la altura del núcleo es de 30 cm

No se puede definir un valor asintótico en ninguna de las dos pieles, aunque sí que tienden a él, pero por falta de datos a mayores velocidades resulta imposible. Lo que sí se puede afirmar es que el valor asintótico al que tiende el área de la zona afectada es menor que cuando el impacto tiene una trayectoria perpendicular.

6.2. ESPESOR.

En este caso se estudia cómo influye el espesor del núcleo en los resultados, usando el panel sándwich usado como modelo base, cuyo espesor es de 60µm, y otros dos paneles de 40 y 80 µm de espesor.

6.2.1. Velocidad residual

▪ Ángulo de Impacto 0°

A continuación se muestra una gráfica (figura 6.2.1.1) donde aparece la evolución de la velocidad residual del proyectil en función de la velocidad de impacto a la que es disparado.

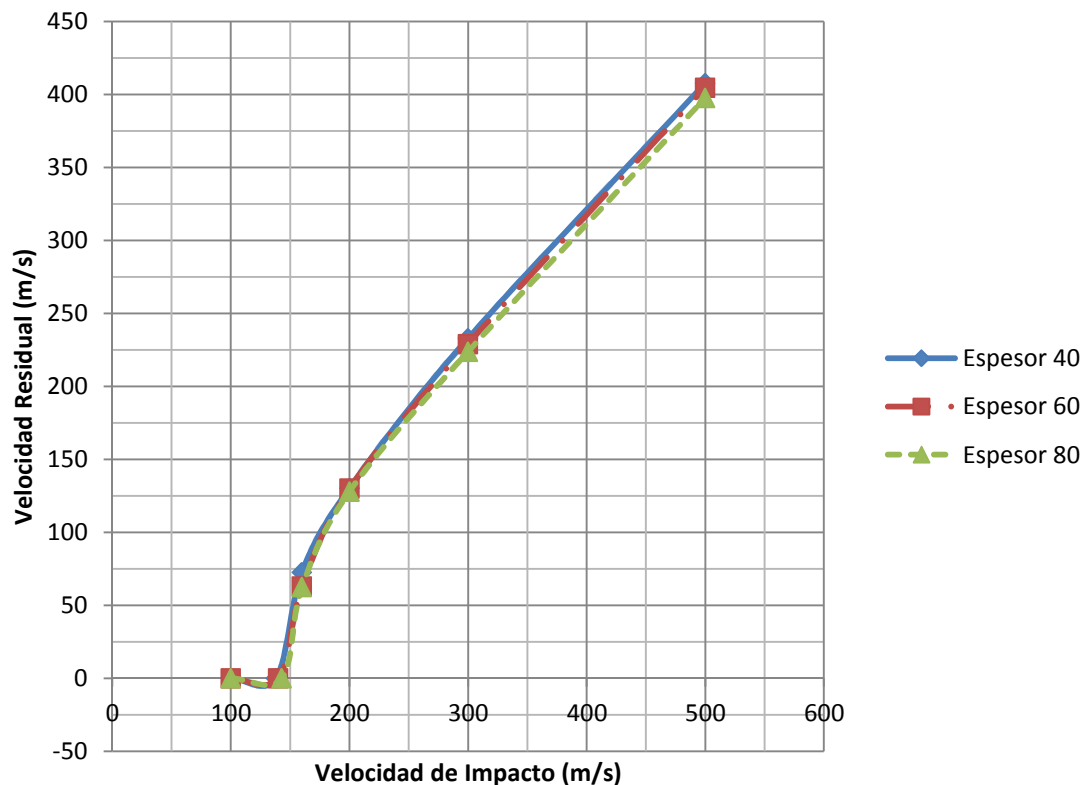


Figura 6.2.1.1: Gráfica que relaciona la velocidad residual y la velocidad de impacto del proyectil cuando impacta con un ángulo de 0°.

LÍMITE BALÍSTICO E=40 μm	LÍMITE BALÍSTICO E=60 μm	LÍMITE BALÍSTICO E=80 μm
138 m/s	140 m/s	143 m/s

Tabla 6.2.1.1: Límite balístico de cada panel sándwich cuando el ángulo de impacto es 0°.

La gráfica apenas muestra diferencias de resultados en los tres casos. Comprobando la tabla 6.2.1.1, se observa una diferencia en el valor del límite balístico muy baja entre los diferentes paneles sándwich. Por lo tanto, cuando el impacto del proyectil es perpendicular a las pieles del panel, las diferencias en los resultados son mínimas. En el caso de la variación de altura se obtenía también una diferencia baja, pero más pronunciada que al variar el espesor del núcleo. Para estudiar mejor la participación de la variación del espesor del núcleo se harán nuevas simulaciones pero con un ángulo de impacto de 45°, pues es en ese caso cuando el honeycomb tiene más protagonismo.

▪ Ángulo de Impacto 45°

A continuación se muestra en la figura 6.2.1.2 la gráfica que relaciona la velocidad residual con la velocidad de impacto cuando el proyectil impacta con un ángulo de 45°. Como era de esperar, el límite balístico será mayor en todos los casos, sobre todo por el hecho de que el proyectil impacta contra una cantidad de masa mayor. Sin embargo sigue sin observarse una gran diferencia de resultados al aumentar el espesor del núcleo. Entre el panel que posee un núcleo de 40 μm de espesor y el panel con un espesor de 80 μm existe una diferencia de solo 10 m/s entre límites balísticos, tal como refleja la tabla 6.2.1.2. Por lo tanto se ve que al doblar el valor del espesor del honeycomb, y por consiguiente la masa de éste, se obtiene una mejora en el límite balístico muy baja.

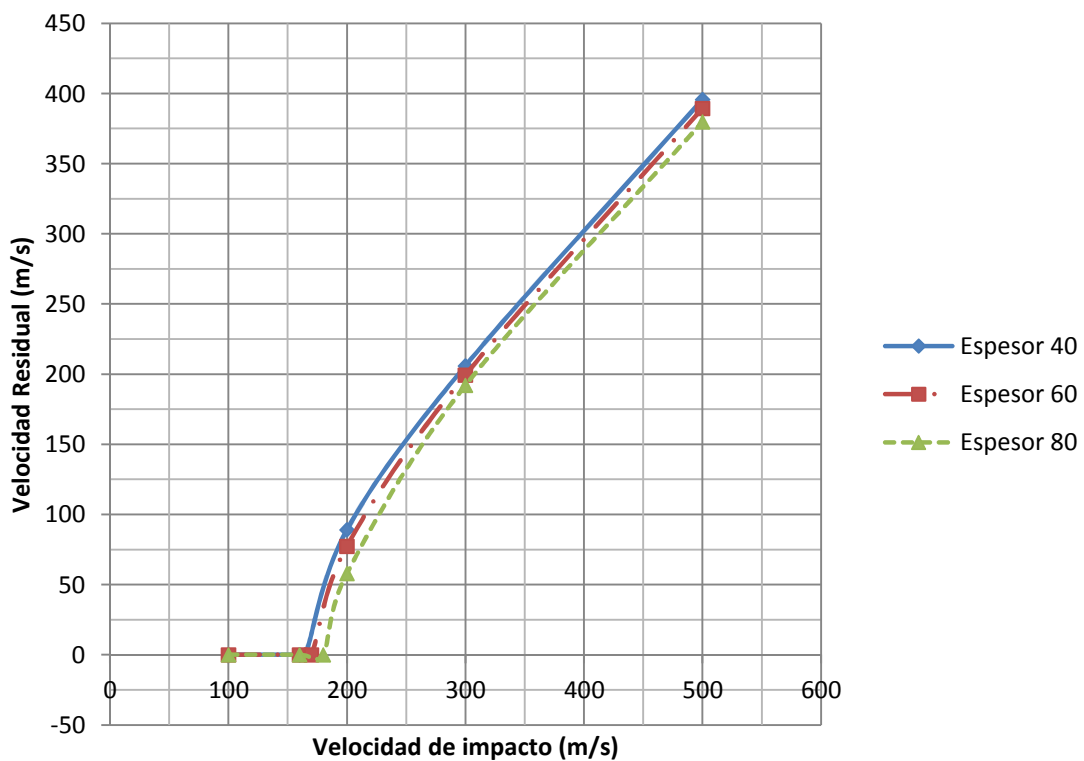


Figura 6.2.1.2: Gráfica que relaciona la velocidad residual y la velocidad de impacto del proyectil cuando impacta con un ángulo de 0

LÍMITE BALÍSTICO E=40 μm	LÍMITE BALÍSTICO E=60 μm	LÍMITE BALÍSTICO E=80 μm
165 m/s	170 m/s	175 m/s

6.2.1.1: Límite balístico de cada panel sándwich cuando el ángulo de impacto es 45°.

En la gráfica de la figura 6.2.1.3 se muestra de nuevo como el límite balístico del panel sándwich apenas varía al aumentar el espesor de las paredes del honeycomb, sobre todo en el caso en que el proyectil impacta de manera perpendicular.

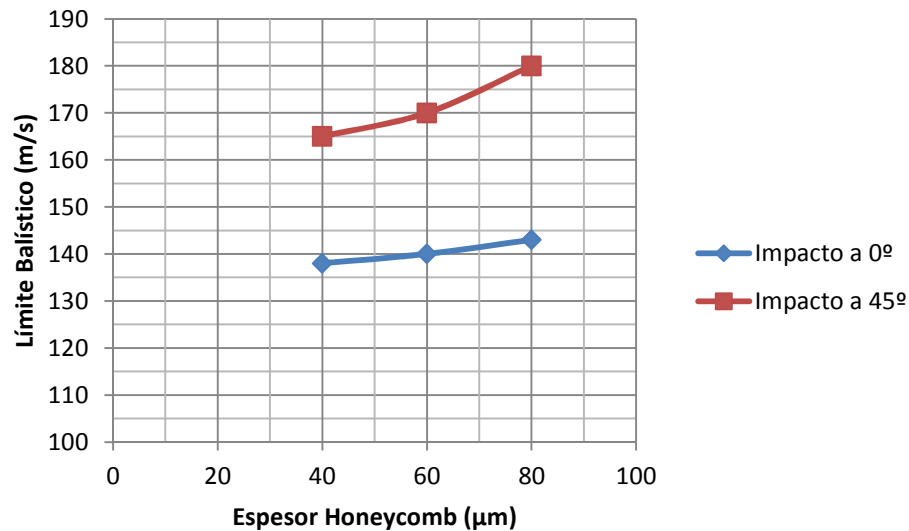


Figura 6.2.1.3: Gráfica que muestra la evolución del límite balístico al aumentar el espesor del núcleo del panel sándwich, según el ángulo de impacto del proyectil.

6.2.2. Absorción de energía.

En la siguiente gráfica de la figura 6.2.2.1 se recogen los datos obtenidos al medir la energía absorbida, en tanto por ciento, del núcleo. Una vez estudiado el efecto que tiene el espesor sobre la velocidad residual del proyectil, es lógico que los resultados que se obtengan no reflejen una gran variación en la absorción de energía por parte del núcleo.

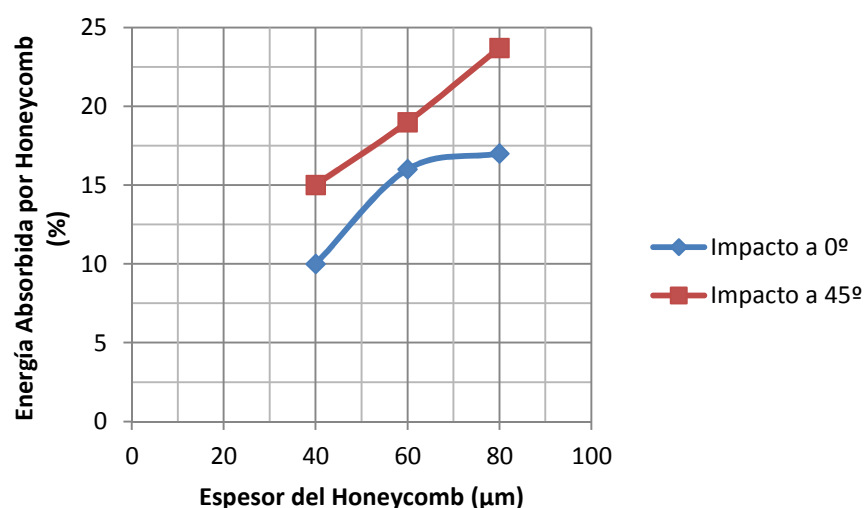


Figura 6.2.2.1: Evolución de la energía absorbida por el núcleo al variar su espesor

Al igual que el caso en el que se ha variado la altura del núcleo, se observa una tendencia en la que, cuando el proyectil tiene un ángulo de impacto de 0° , hay un aumento importante en el porcentaje de energía absorbida por el núcleo al principio, disminuyendo bastante a partir de los 60 μm de espesor. En cambio cuando aumentamos el ángulo a 45° , el aumento es prácticamente igual a lo largo de la curva, siendo ligeramente mayor a medida que aumenta el espesor.

6.2.3. Delaminación

Al igual que en el caso anterior, se estudia cómo afecta la variación en el espesor a la delaminación de las pieles. Uno de los principales resultados a observar será como a ciertas velocidades, el espesor del núcleo sí que influye en la delaminación de la piel superior.

■ Ángulo de impacto 0°

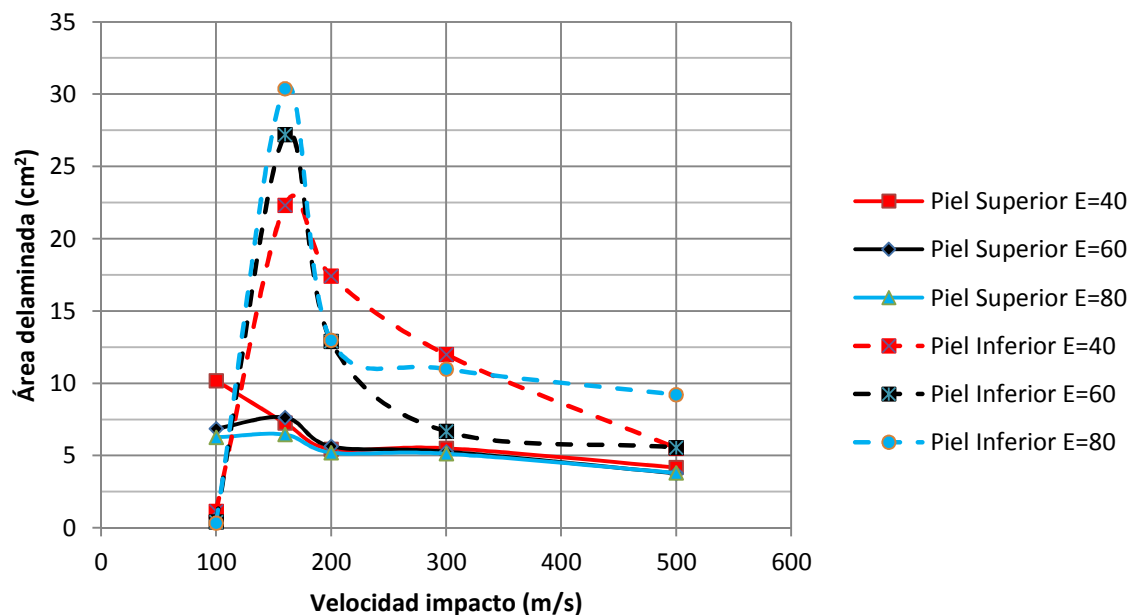


Figura 6.2.3.1: Gráfico que relaciona la delaminación que se produce en ambas pieles con la velocidad de impacto del proyectil. Ángulo de impacto = 0° .

La gráfica de la figura 6.2.3.1 muestra la evolución del área delaminada en cada una de las pieles, para para cada uno de los casos estudiados.

La principal diferencia con el parámetro antes estudiado (altura) es que ahora el espesor va a influir en la delaminación de la piel superior. En este caso es poco apreciable, pues la trayectoria del proyectil es perpendicular, pero sí que se obtienen datos diferentes a bajas velocidades (100 m/s). Como se ha explicado anteriormente, el honeycomb aporta a la piel superior rigidez al evitar que ésta fleche. Por lo tanto, cuanto mayor es el espesor, mayor es la protección que el núcleo ofrece, y por consiguiente la delaminación producida es más reducida. Esto es exactamente lo que se aprecia a 100 m/s , donde la mayor delaminación se obtiene cuando el espesor de pared del núcleo es tan solo de 40 μm (figura 6.2.3.2).

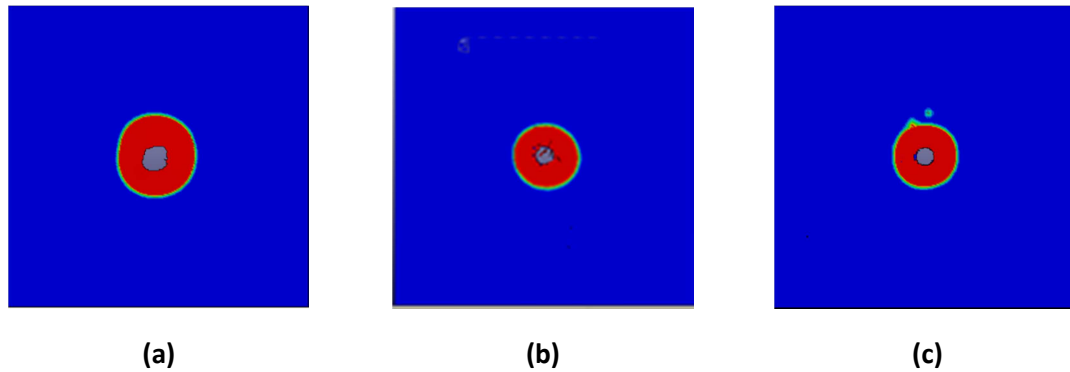


Figura 6.2.3.2: Delaminación de la piel superior cuando el proyectil impacta 100 m/s con un ángulo de 0° al variar el espesor del núcleo de 40 (a), 60 (b) a 80 μm (c).

En la piel inferior se obtienen los resultados esperados tanto en la zona donde la delaminación tiene su valor máximo, como a altas velocidades, cuando el área tiende a alcanzar un valor constante. En cambio a velocidades media (200 m/s y 300 m/s) se muestran unos resultados que no son lo esperado. En principio, cuanto mayor es la masa del núcleo (mayor espesor) el más se frena el proyectil, y por lo tanto la velocidad con la que impacta contra la piel inferior es menor, causando una zona delaminada más grande. Sin embargo, a esas velocidades la mayor delaminación está localizada en el panel con el núcleo de menor espesor. Esto puede ser debido a que la geometría del núcleo afecta a la delaminación de la piel inferior más allá de la simple velocidad con que hace que impacte el proyectil, pero a falta de más resultados, resulta imposible sacar una conclusión. De todas formas, a partir de los 300 m/s la delaminación de las pieles comienza a estabilizarse, siendo a final el panel con el núcleo de 80 μm de espesor el que mayor delaminación presenta, tal y como se refleja en la figura 6.2.3.3.

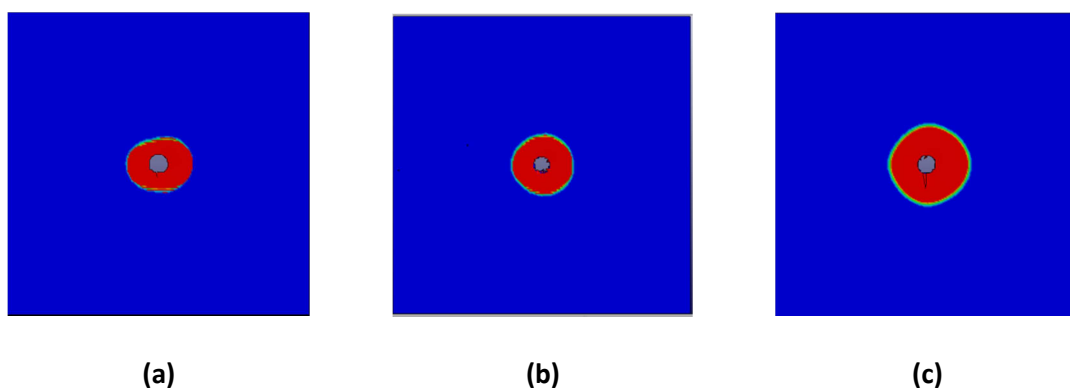


Figura 6.2.3.3: Delaminación de la piel inferior cuando el proyectil impacta a 500 m/s con un ángulo de 0° al variar el espesor del núcleo de 40 (a), 60 (b) a 80 μm (c).

▪ Ángulo de impacto 45°

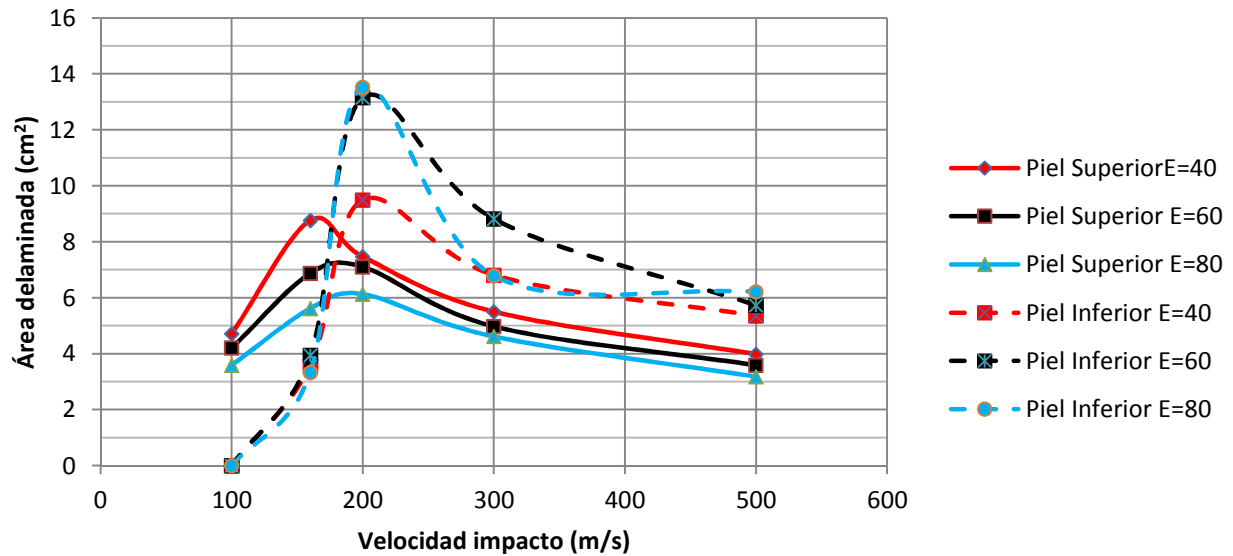


Figura 6.2.3.4: Gráfico que relaciona la delaminación que se produce en ambas pieles con la velocidad de impacto del proyectil. Ángulo de impacto = 45°.

Cuando la trayectoria del proyectil es de 45°, la protección que confiere el honeycomb a la piel superior se hace mucho más importante. Como bien se observa en la gráfica de la figura 6.2.3.4, el área delaminada a lo largo de toda la curva sigue la misma tendencia, siendo siempre mayor en la piel superior correspondiente al núcleo de 40 µm de espesor, pues como ya se ha explicado, es el que menor protección y rigidez aporta a la piel. En cambio, cuando el espesor de pared es de 80 µm el efecto es más localizado, presentando una zona afectada más reducida. Este hecho se aprecia muy bien en la figura 6.2.3.5, que muestra la delaminación de la piel superior cuando la velocidad de impacto es de 160 m/s, pues es una velocidad muy próxima al límite balístico, y por lo tanto es la zona donde los valores del área delaminada son máximos.

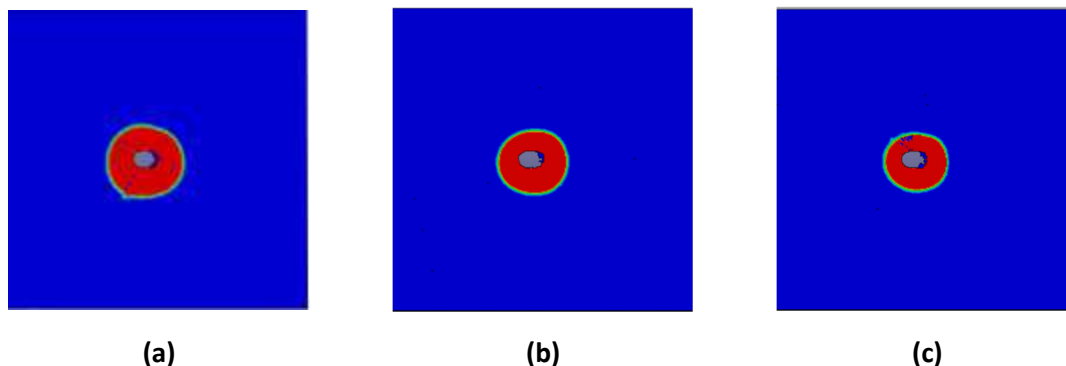


Figura 6.2.3.5: Delaminación de la piel superior cuando el proyectil impacta a 160 m/s con un ángulo de 45° al variar el espesor del núcleo de 40 (a), 60 (b) a 80 µm (c).

Al igual que cuando la trayectoria del proyectil es perpendicular, en la piel inferior no se obtienen los resultados esperados. En el punto máximo y a altas velocidades la piel inferior sí que presenta el área delaminada esperada en cada uno de los casos, siendo ésta menor cuanto menor es el espesor de pared, aunque las diferencias tampoco son muy apreciables. En cambio a velocidades intermedias (200, 300 m/s) se vuelven a ver ciertas irregularidades, que nuevamente pueden ser debidas a una posible influencia de la geometría del honeycomb sobre la piel inferior. A falta de más resultados, no se puede dar una conclusión sobre este comportamiento.

Un dato a destacar es que mientras que la zona de delaminación máxima en la piel inferior, cuando el ángulo de impacto es de 0° , está situada a velocidades cercanas a los 160 m/s, cuando la trayectoria del proyectil cambia, ángulo de 45° , esta zona se sitúa en velocidades cercanas a los 200 m/s. Esto se explica por el aumento del límite balístico que experimenta la estructura al aumentar el ángulo de impacto. La piel superior a su vez muestra siempre unos valores de delaminación máximos en un mismo rango de velocidades. La figura 6.2.3.6 muestra como a 160 m/s el proyectil es incapaz de atravesar la segunda piel, a pesar de conseguir perforarla en parte, siendo el límite balístico por tanto mayor que 160 m/s. Cuando el espesor es de $40\ \mu\text{m}$, el proyectil se frena menos al tener que atravesar menos masa y consigue provocar la mayor rotura. En cambio, el panel con el núcleo de mayor espesor consigue frenar lo suficiente al proyectil para que no consiga romper apenas el laminado.

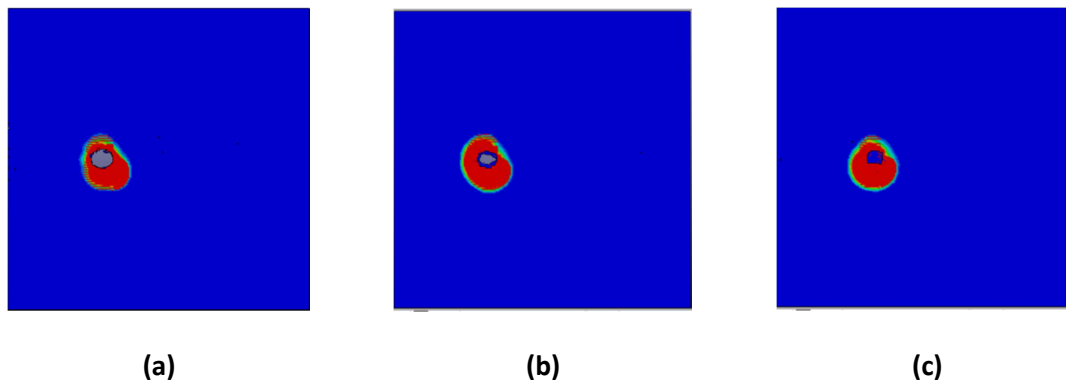


Figura 6.2.3.6: Delaminación de la piel inferior cuando el proyectil impacta a 160 m/s con un ángulo de 45° al variar el espesor del núcleo de 40 (a), 60 (b) a $80\ \mu\text{m}$ (c).

6.3. TAMAÑO DE CELDA

El último parámetro a estudiar será el tamaño de la celda del honeycomb. El tamaño usado en el modelo base es de 4.8mm, lo que corresponde a una celdilla de 3/16". En este caso solo se comparará con un tamaño mayor, el correspondiente a una celdilla de 1/4", es decir, 6.4mm. La razón de escoger estas medidas para el tamaño es que son las que se fabrican.

6.3.1. Velocidad residual

▪ Ángulo de impacto 0°

Para obtener la gráfica de la figura 6.3.1.1, se ha simulado el impacto del proyectil a las velocidades de: 100, 160, 200, 300 y 500 m/s. La gráfica muestra que siendo el impacto del proyectil perpendicular, la diferencia entre las capacidades de frenado del proyectil de ambos paneles es muy baja, como puede comprobarse en la tabla 6.3.1.1, donde se muestra el límite balístico de ambos paneles.

En general, una vez estudiados los tres casos diferentes, se puede sacar la conclusión de que siendo el impacto perpendicular al panel sándwich, las variaciones en la velocidad residual son reducidas. El caso con mayores diferencias, y por lo tanto el más efectivo para aumentar la protección balística del panel es el caso en que el parámetro a variar es la altura.

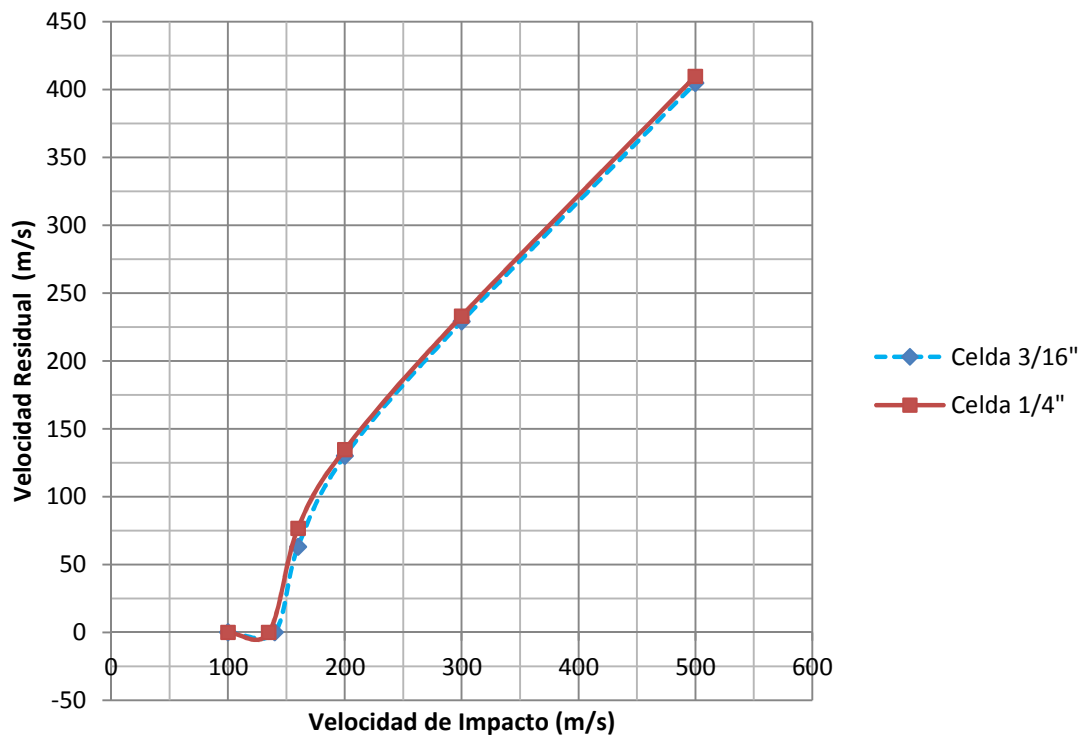


Figura 6.3.1.1: Gráfica que relaciona la velocidad residual y la velocidad de impacto con diferentes tamaños de celda, cuando el ángulo de impacto es 0°

LÍMITE BALÍSTICO D = 4,8 mm	LÍMITE BALÍSTICO D = 6,4 mm
140 m/s	135 m/s

Tabla 6.3.1.1: Límite balístico de cada panel sándwich cuando el ángulo de impacto es 0°.

▪ Ángulo de impacto 45°

Como ya se ha comprobado en los dos casos previos estudiados, las diferencias al aumentar el ángulo con el que impacta el proyectil se hacen más importantes, adquiriendo el núcleo más protagonismo. Sin llegar a ser una diferencia muy notable, se observa en la figura 6.3.1.2 como al aumentar el tamaño de las celdas que forman el honeycomb, la velocidad residual del proyectil (a una misma velocidad de impacto) aumenta. Esto es debido a que a mayor tamaño de celda, es un mismo espacio habrá menos cantidad de material, disminuyendo por lo tanto el contacto entre proyectil y núcleo. La tabla 6.3.1.2 y la figura 6.3.1.3 muestran la evolución del límite balístico al variar el tamaño de la celda.

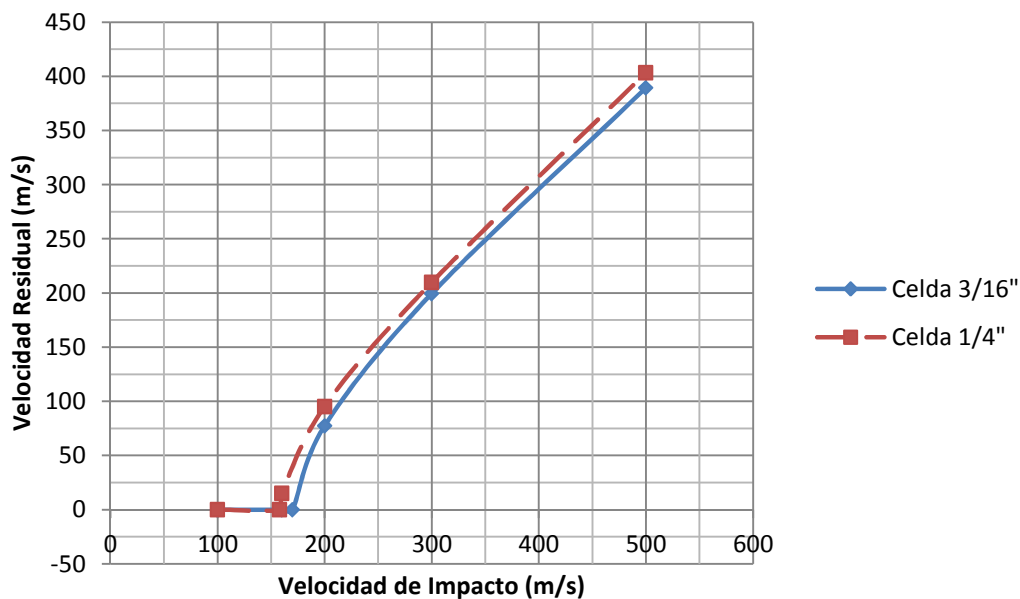


Figura 6.3.1.2: Gráfica que relaciona la velocidad residual y la velocidad de impacto con diferentes tamaños de celda, cuando el ángulo de impacto es 45°.

La tabla 6.3.1.2 y la figura 6.3.1.3 muestran la evolución del límite balístico al variar el tamaño de la celda. En la gráfica se puede observar la poca evolución del límite balístico cuando el impacto tiene un ángulo de 0°, al igual que en todos los casos estudiados. La evolución al aumentar el ángulo de impacto es mayor, variando en torno a los 12 m/s.

LÍMITE BALÍSTICO D = 4.8 mm	LÍMITE BALÍSTICO D = 6.4 mm
170 m/s	158 m/s

Tabla 6.3.1.2: Límite balístico de cada panel sándwich cuándo el ángulo de impacto es 45°.

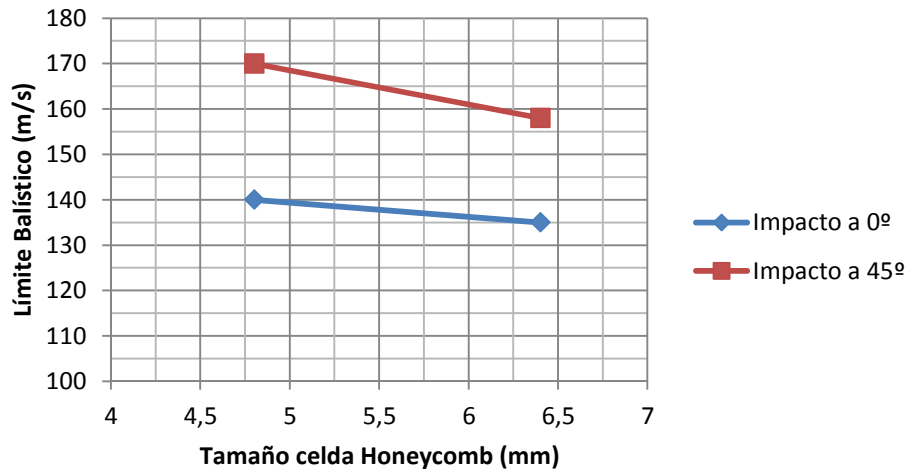


Figura 6.3.1.3: Gráfica que muestra la evolución del límite balístico al variar el tamaño de la celda que forma el núcleo, según el ángulo de impacto del proyectil.

Observando la gráfica, parece que en este caso la evolución del límite balístico presenta la misma tendencia. De todos modos al tener solo dos puntos es difícil obtener buena una conclusión.

6.3.2. Absorción de energía.

Al igual que en los dos casos previos, es interesante estudiar cómo evoluciona la implicación del núcleo en la absorción de energía cinética del proyectil. En este caso no se obtiene mucha información en cuanto a la evolución de la curva, pues solo se dispone de dos datos de cada tipo de impacto. A pesar de no saber la tendencia que sigue la curva, se vuelve a comprobar que al variar las propiedades del núcleo, éste influye más en el frenado del proyectil. Como refleja la figura 6.3.2.1 cuanto más pequeñas son las celdas hexagonales que forman el núcleo de honeycomb, más capacidad de absorción de energía tiene el núcleo.

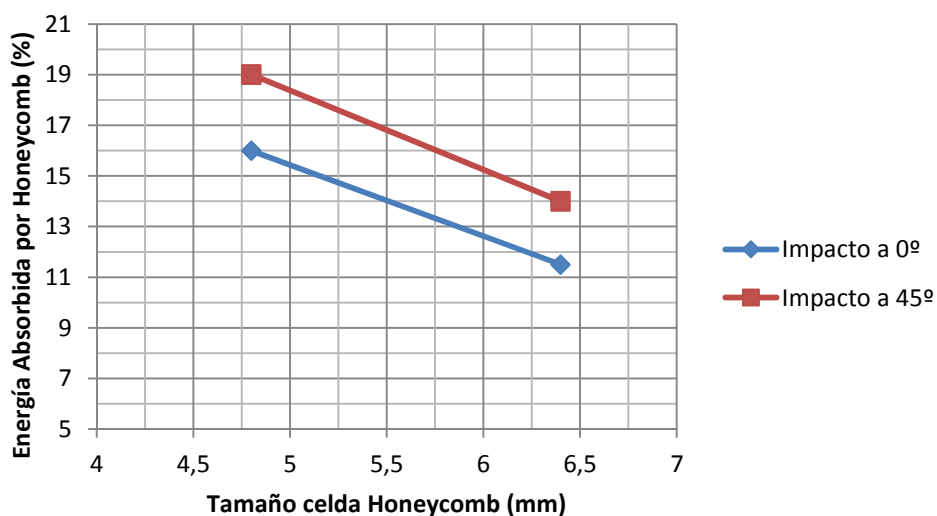


Figura 6.3.2.1: Energía absorbida por el núcleo en función del tamaño de celda de éste, para los ángulos de impacto del proyectil de 0° y 45°, a $V_{\text{impacto}}=300$ m/s.

6.3.3. Delaminación.

Como ya se ha visto en el caso anterior, ciertos cambios en los parámetros del núcleo influyen en la delaminación, más allá de la velocidad residual. En el caso del espesor, cuanto más espesor tenían las paredes del núcleo, mayor rigidez proporcionaba éste a la piel superior, reduciendo la delaminación y la flexión en ésta. En este caso, la diferencia no es tan grande, pero sí que se aprecia como al aumentar el tamaño de celda la piel superior la protección disminuye, pues está en contacto con menos celdas. En la figura 6.3.3.1 se muestra una imagen comparando ambos núcleos, y viendo la diferencia que existe en el momento del contacto con el proyectil.

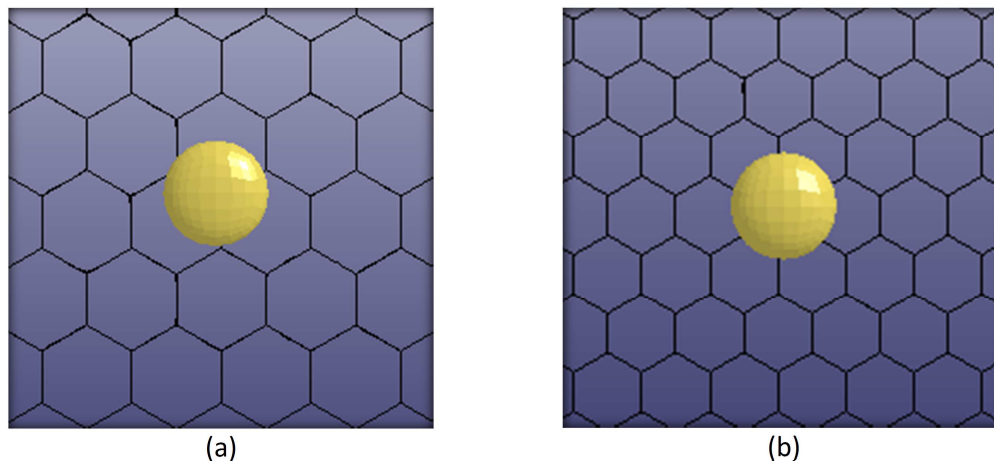


Figura 6.3.3.1: Detalle del tamaño de las celdas del núcleo en comparación en el proyectil. (a) Celdas de 1/4"; (b) Celdas de 3/16".

▪ Ángulo de impacto 0°

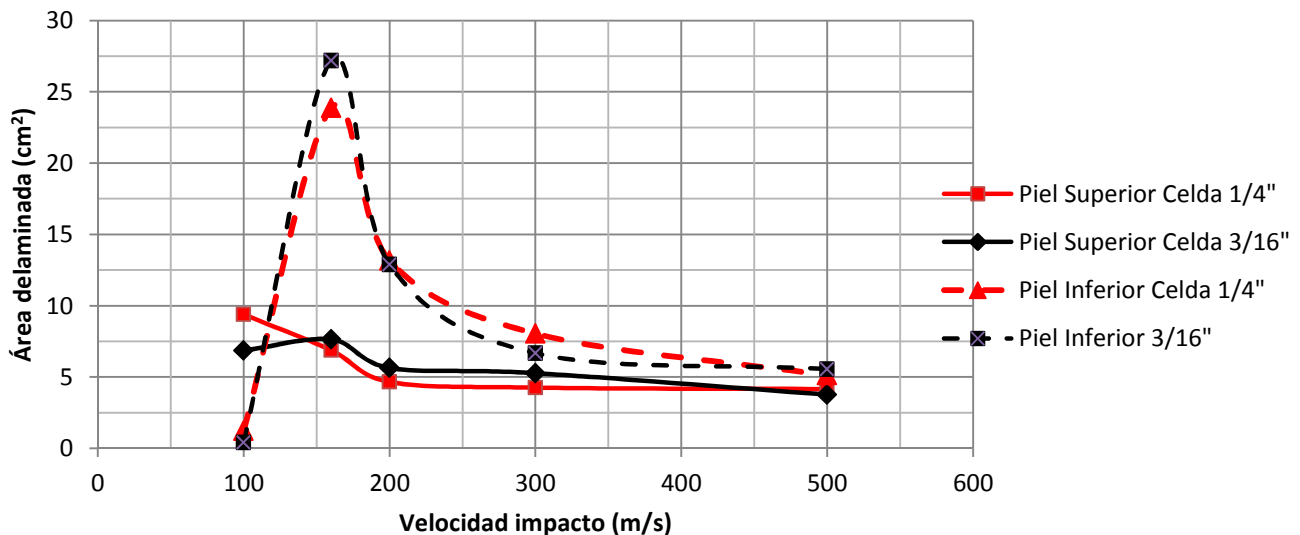


Figura 6.3.3.2: Grafico que relaciona la delaminación que se produce en ambas pieles con la velocidad de impacto del proyectil. Ángulo de impacto = 0°.

La figura 6.3.3.2 muestra la delaminación de cada piel a diferentes velocidades de impacto, de modo que se puede comparar las diferencias existentes al variar el tamaño de celda del núcleo de honeycomb. Al igual que cuando el parámetro a cambiar era el espesor,

solo a velocidades muy bajas (100 m/s) se aprecia la rigidez que aporta el honeycomb a la piel superior. Puesto que cuanto mayor es el tamaño de la celda, menor protección ofrece el núcleo, es el panel con el honeycomb de celdas de 1/4" el que muestra un área delaminada más grande (figura 6.3.3.3). A partir de esta velocidad ambas pieles se comportan de manera muy similar.

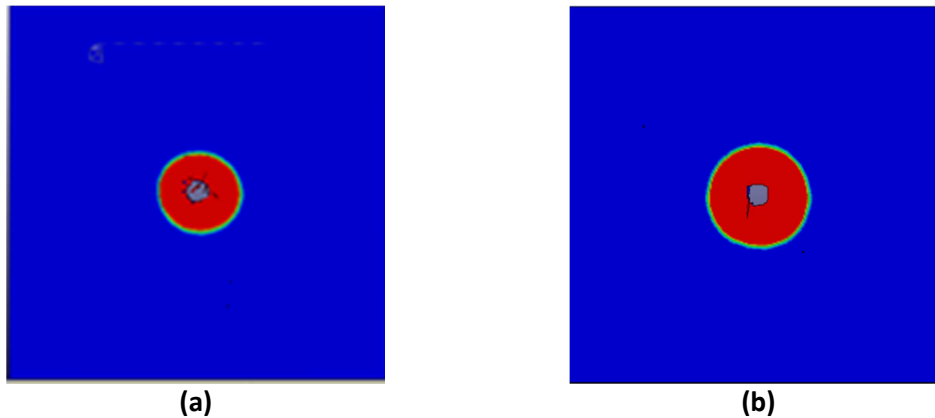


Figura 6.3.3.3: Delaminación de la piel superior cuando el proyectil impacta 100 m/s con un ángulo de 0° al variar el tamaño de celda del núcleo de 3/16" (a) a 1/4" (b).

La piel inferior solo muestra diferencias cuando la velocidad es muy cercana al límite balístico, es decir, en la zona donde los valores del área delaminada son máximos. Como es evidente, es la piel del panel sándwich con un tamaño de celda menor (3/16") el que mayor delaminación presenta, pues el proyectil impacta con menor velocidad al tener que atravesar una mayor cantidad de masa.

A partir de los 200 m/s el efecto del impacto se vuelve más localizado en la piel inferior dejándose de apreciar las diferencias. Como en los otros dos casos anteriores, la delaminación en ambas pieles tiende a un valor asintótico de aproximadamente 5 cm² de área.

▪ **Ángulo de impacto 45°**

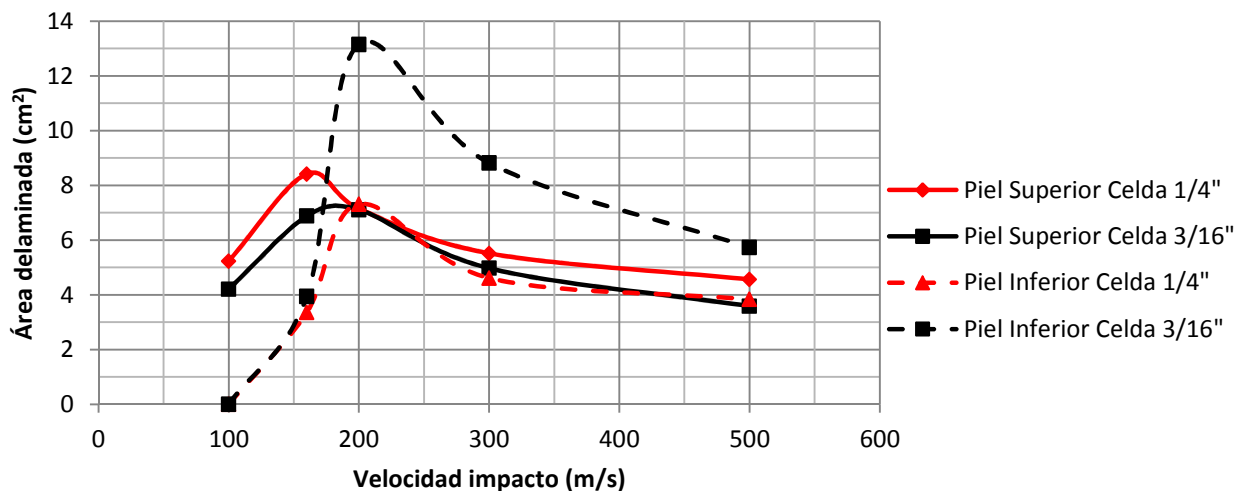


Figura 6.3.3.4: Grafico que relaciona la delaminación que se produce en ambas pieles con la velocidad de impacto del proyectil. Ángulo de impacto = 45°.

Cuando el ángulo de impacto es 45° se obtiene de nuevo las mayores diferencias en la piel superior (figura 6.3.3.4). Con esta trayectoria, la protección ofrecida por el honeycomb se vuelve mucho más importante. Puesto que al aumentar el tamaño de celda disminuye la rigidez que aporta el núcleo a la piel, la zona delaminada provocada por el proyectil en la primera piel del panel con celdas de $1/4''$ es mayor que en el otro caso ($3/16''$). Con esta trayectoria, las diferencias en la delaminación de ambas pieles superiores se observa a todas las velocidades estudiadas. El punto de mayor diferencia es cuando el proyectil impacta a una velocidad de 160 m/s, que como ya se ha explicado, está dentro del rango de velocidades donde la piel superior sufre las mayores delaminaciones (figura 6.3.3.5). Se observa incluso como a causa de ese aumento del tamaño de celda, la zona afectada no es tan elíptica, si no que presenta un área más circular.

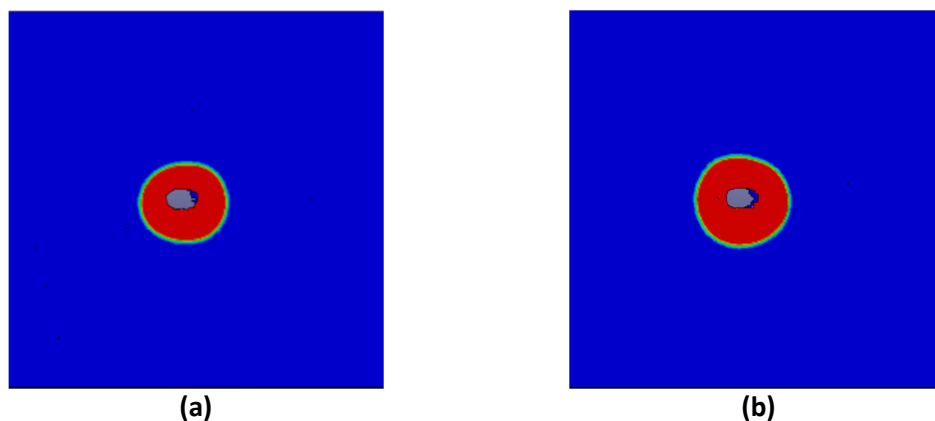


Figura 6.3.3.5: Delaminación de la piel superior cuando el proyectil impacta a 160 m/s con un ángulo de 45° al variar el tamaño de celda del núcleo de $3/16''$ (a) a $1/4''$ (b).

La piel inferior a su vez muestra los resultados esperados. Cuanta mayor es la velocidad con la que impacta el proyectil contra la piel, menor será el área delaminada. Esto es lo que se observa en la gráfica de la figura 6.3.3.4. No obstante, la diferencia que se presenta es demasiado grande. Al igual que el apartado anterior cuando se variaba el espesor, se observó que la piel inferior también podría estar influida por la geometría del núcleo más allá de la diferencia de velocidad con la que éste hace llegar al proyectil. En este caso podría estar ocurriendo lo mismo, pues si comparamos el resto de velocidades residuales obtenidas en los apartados anteriores, la delaminación no debería ser tan reducida. Además, a partir de 200 m/s se observa como el área afectada obtenida en la piel inferior es incluso más reducida que la que se observa en la piel superior, lo cual no resulta lógico según el resto de casos estudiados. Por lo tanto, se expone nuevamente la posibilidad de que la geometría del núcleo tenga de algún modo influencia sobre la delaminación que causa el impacto del proyectil en la piel inferior. En la figura 6.3.3.6 se muestra una imagen del área delaminada cuando la velocidad de impacto es de 200 m/s, pues es el punto donde la delaminación es máxima.

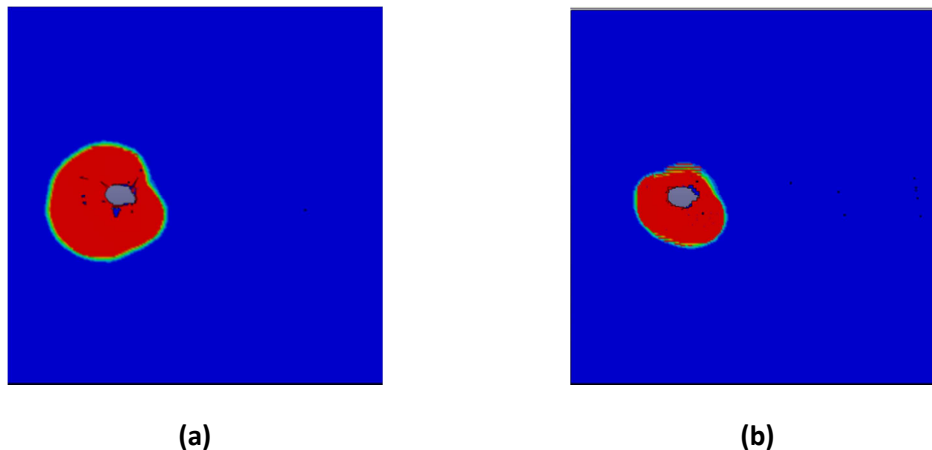


Figura 6.3.3.6: Delaminación de la piel inferior cuando el proyectil impacta a 200 m/s con un ángulo de 45° al variar el tamaño de celda del núcleo de 3/16" (a) a 1/4" (b).

6.4. CONCLUSIONES.

Una vez estudiados todos los casos se puede concluir que:

- ✓ Cuando el ángulo de impacto es 0°, las variaciones en las dimensiones del núcleo (altura, espesor y tamaño de celda) no son muy determinantes. En cambio si se aumenta el ángulo de impacto el honeycomb adquiere más protagonismo. Esto es debido a la mayor cantidad de masa que tiene que atravesar el proyectil.
- ✓ Las dimensiones del núcleo no solo afectan a la velocidad residual del proyectil sino que también afecta a la rigidez de la piel superior. Cuanto mayor es el espesor o más pequeño es el tamaño de celda, más protección ofrece el honeycomb, y menos delaminación sufre la piel superior.
- ✓ Existe la posibilidad de que la geometría del núcleo influya también en la delaminación de la piel inferior.

Entre los diferentes parámetros variados no se puede sacar una conclusión absoluta de que variación es la mejor, pues aunque la variación de la altura sea la que mayores diferencias ha generado, lo más preciso es estudiar los resultados obtenidos en función de la cantidad de masa de honeycomb que hay por área.

Puesto que todos los paneles tienen el mismo área frontal, se estudia la evolución del límite balístico en función del peso por metro cuadrado del núcleo (densidad areal).

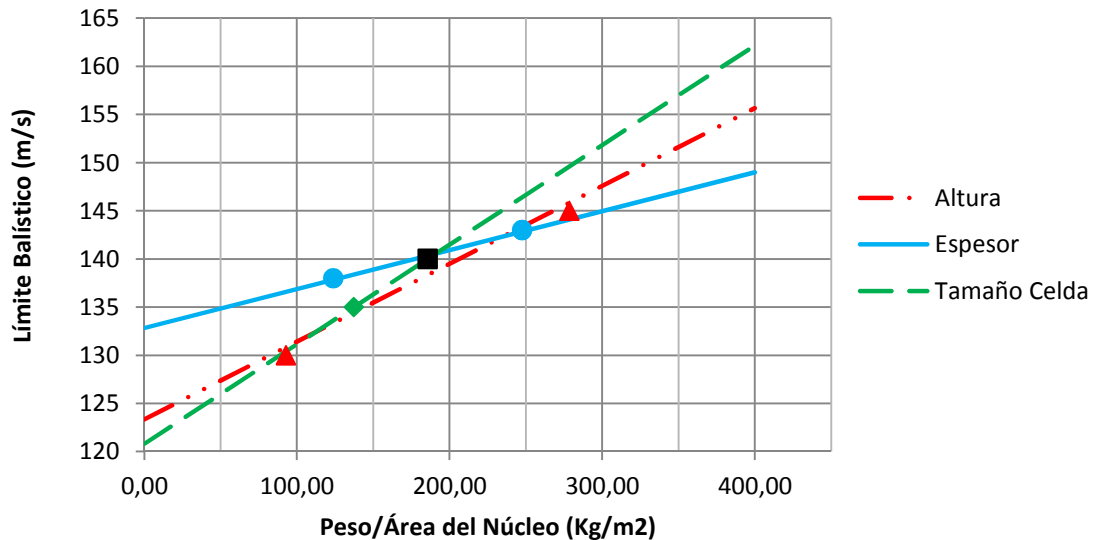


Figura 6.4.1: Gráfica que muestra la evolución del límite balístico al variar la densidad areal, cuando el ángulo de impacto es de 0°.

En la gráfica de la figura 6.4.1 se observan tres rectas. Cada una se corresponde con uno de los parámetros estudiados, siendo el cuadrado negro el modelo de referencia utilizado. Cada recta se corresponde a una regresión de los resultados obtenidos al aumentar o disminuir cada uno de los parámetros, de modo que se pueda obtener una visión general de que parámetro provoca una variación más sensible en el límite balístico. En este caso los datos del límite balístico son los correspondientes a un impacto perpendicular.

Cabe destacar la gran linealidad que presentan los resultados, siendo el valor de R2 igual o muy próximo a 1.

La siguiente gráfica (figura 6.4.2) muestra los mismos resultados, pero esta vez cuando el ángulo de impacto es de 45°.

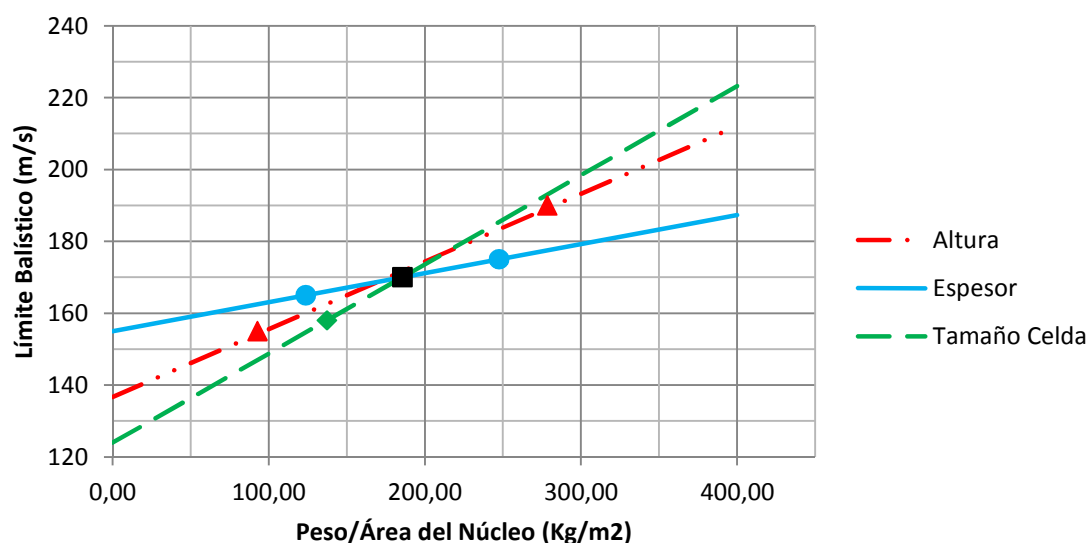


Figura 6.4.2: Gráfica que muestra la evolución del límite balístico al variar la densidad areal, cuando el ángulo de impacto es de 45°.

La tendencia de cada una de las regresiones es la misma que en el caso anterior. En este caso el valor de R^2 también es muy cercano a 1, por lo que se vuelven a obtener unos resultados muy lineales, dotando de mayor fiabilidad a cada una de las regresiones.

Las conclusiones a las que se puede llegar después de estudiar ambas gráficas son:

- ✓ El tamaño de celda provoca la mayor variación en el límite balístico. Si se buscase incrementar la protección balística de la estructura sin querer elevar demasiado la cantidad de material, el tamaño de celda sería el parámetro más óptimo a variar. De todas formas solo se dispone de dos casos, por lo que no se puede confirmar al 100% que la tendencia de los resultados sea la obtenida.
- ✓ El límite balístico es menos sensible a una variación del espesor. Por ejemplo, si la intención fuese la de reducir la cantidad de material del núcleo con el objetivo de ahorrar en coste de material, pero sin disminuir en exceso el límite balístico de la estructura, el parámetro más óptimo a variar sería el espesor.

Sin embargo, no se puede sacar ninguna conclusión absoluta, pues para ello habría que hacer las variaciones manteniendo constante la densidad areal del núcleo. En cambio si se puede suponer que será el parámetro del tamaño de celda el que más influirá en el límite balístico.

7. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS.

7.1. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

En este proyecto se ha estudiado el comportamiento de un panel sándwich frente a impactos de alta velocidad. El panel sándwich estudiado tiene un laminado de tejido de fibra de carbono-epoxy, y un núcleo de honeycomb de aluminio. El estudio se ha centrado principalmente en variar las dimensiones del núcleo para ver la influencia de éste frente a impactos balísticos. Para ello se ha generado mediante el software de programación MATLAB® un programa que permita crear de forma automática un panel sándwich con las medidas y características en el programa de elementos finitos LS-DYNA®.

Se comienza creando un modelo de referencia con las mismas dimensiones y características que el modelo usado en la tesis doctoral de B. Buitrago ^[7], de forma que los resultados numéricos obtenidos puedan ajustarse a los resultados experimentales obtenidos en dicha tesis. Los resultados obtenidos del modelo numérico son la velocidad residual del proyectil según diferentes velocidades de impacto. Una vez ajustados los resultados numéricos y experimentales, llegando a obtener un error máximo del 5%, el modelo numérico queda validado.

Del modelo de referencia, además de obtener el límite balístico, se estudia la absorción de energía cinética del proyectil de cada una de las partes que forma el panel sándwich. Se obtiene que a velocidades muy cercanas del límite balístico, la piel inferior es la principal protagonista en el mecanismo de absorción, posiblemente debido a que a estas velocidades la energía absorbida por deformación, rotura y delaminación en esta piel son muy determinantes. En cambio, a medida que se aumenta la velocidad de impacto, alejándose del límite balístico, es la piel superior la que mayor porcentaje de energía cinética absorbe. A altas velocidades los porcentajes de absorción de energía cinética se estabilizan obteniéndose unos valores medios: 45% de la energía absorbida por la piel superior, 40% absorbida por la piel inferior y el 15% restante por el núcleo de honeycomb. Sin embargo se demostrará como en función de las dimensiones del núcleo, éste tiene mayor o menor influencia en el mecanismo de absorción.

Una vez validado el modelo numérico, mediante el programa creado con MATLAB se crean más modelos con variaciones en las dimensiones del núcleo: altura, espesor y tamaño de celda. Se estudia la influencia de estos parámetros en la velocidad residual del proyectil, en el límite balístico, en el porcentaje de energía absorbida por el núcleo, y en la delaminación de

las pieles a causa del impacto del proyectil. Cada uno de los casos será estudiado frente a impacto de proyectil con un ángulo de 0° y de 45° . Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- ✓ Cuanto mayor es el peso por metro cuadrado de área frontal del núcleo, mayor es el límite balístico, y por lo tanto mayor protección balística ofrece el panel sándwich. Es decir que al incrementar la altura y el espesor o reducir el tamaño de celda, disminuimos la velocidad residual del proyectil. Al aumentar el peso por metro cuadrado de honeycomb, también lo hace el porcentaje de energía absorbida por éste.
- ✓ Al aumentar el ángulo impacto, el valor del límite balístico crece. Este incremento es debido al mayor tiempo que está en contacto el proyectil con cada una de las partes del panel sándwich, principalmente con las pieles. Sin embargo se muestra una gran evolución de la importancia del núcleo en la absorción de energía, aumentando el protagonismo de éste a medida que aumenta el ángulo.
- ✓ La delaminación de las pieles está principalmente ligada a la velocidad con la que impacta el proyectil. Por debajo del límite balístico, a medida que aumenta la velocidad de impacto, aumenta el área delaminada. En cambio, por encima del límite balístico, a medida que la velocidad de impacto aumenta la zona afectada se reduce concentrándose en torno al agujero creado por el proyectil.
- ✓ Cuando el proyectil consigue atravesar el panel sándwich por completo, es la piel inferior la que mayor delaminación sufre. Esto es debido a que la piel superior tiene una mayor rigidez gracias a la protección que le confiere el honeycomb, lo que reduce el área afectada al producirse un efecto más local. Este hecho se observa en los resultados en los que se varía el área frontal del núcleo, el cual proporciona el área de apoyo. Al aumentar el espesor del núcleo, como se proporcionar una mayor protección a la piel superior está sufre una delaminación menor. Lo mismo ocurre al disminuir el tamaño de celda. Estos resultados solo se aprecian a velocidades relativamente cercanas al límite balístico.
- ✓ Según los datos obtenidos con la delaminación de las pieles, se expone la posibilidad de que la geometría del núcleo, pueda influir también en la delaminación de la piel inferior.
- ✓ A priori, el límite balístico presenta una mayor sensibilidad frente a una variación del tamaño de celda. A su vez, el espesor es el parámetro que menor variación provoca en el valor del límite balístico.

7.2. TRABAJOS FUTUROS.

Como posibles trabajos futuros que podrían ampliar el estudio realizado en este Proyecto Fin de Carrera, se proponen los siguientes:

- ✓ Aumentar el número de casos estudiados para conseguir una conclusión más cercana a la realidad sobre que parámetro proporciona una mayor variación en los resultados. Para ello sería interesante comparar la variación de los diferentes parámetros frente una misma densidad areal.
- ✓ Plantear un estudio económico paralelo para terminar de encontrar la configuración más óptima del núcleo de honeycomb.
- ✓ Mejorar el modelo genérico creado con MATLAB para poder cambiar también los materiales y el laminado de las pieles, de forma que se pueda avanzar en la búsqueda de la configuración más óptima de panel sándwich en cuanto a buscar la mejor protección balística posible. Se propone el material NOMEX y un laminado unidireccional.
- ✓ Ampliar el estudio de la absorción de energía por parte de las pieles, para afianzar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **José Manuel Rodríguez Rodríguez**, "Estructuras sándwich" -> materiales.wikispaces.com
- [2] **Carlos Navarro Ugena, Enrique Barbero Pozuelo**, "Introducción a Estructuras Sándwich" -> Apuntes de la asignatura "Elasticidad y Resistencia de Materiales II".
- [3] **M^a Luisa Romero Galera**, "Estudio del comportamiento estructural de paneles sándwich empleados en el carenado de aviones comerciales", Volumen 1, Capítulo 2.
- [4] **Juan Maria Malavia Otero**, "Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio".
- [5] **Abrate S.**, "Impact on composite structures". Cambridge University Press; (1998).
- [6] **Abrate S.**, "Impact engineering of composite structures". International Centre for Mechanical Sciences; (2011).
- [7] **Brenda L. Buitrago**, "Comportamiento de estructuras de material compuesto sometidas a cargas impulsivas". Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [8] **Brenda L. Buitrago, Shirley K. García-Castillo, Enrique Barbero**. "Experimental analysis of perforation of glass/polyester structures subjected to high-velocity impact". Materials Letters 64, 1052–1054. (2010).
- [9] **Brenda L. Buitrago, Carlos Santiuste, Sonia Sánchez-Sáez, Enrique Barbero, Carlos Navarro** "Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact". Composite Structures 92, 2090–2096. (2010).
- [10] **Giovanni Barrera Torres**, "Comportamiento de un panel laminado compuesto a partir de materiales poliméricos y cerámicos ante el impacto de un proyectil metálico". (2011)
- [11] **Arturo Flores Liahut**, "El Honeycomb (Estructura de Panal) como refuerzo estructural", Universidad Veracruzana, 2011.
- [12] **Lucas Colabella, Adrián Cisilino, Ariel Stocchi, Ariel Ibarra Pino**. "Caracterización el comportamiento elástico de paneles tipo Honeycomb de material compuesto, utilizando herramientas de homogenización". Mecánica Computacional Vol. XXXI, págs. 1821-1837. (2012)
- [13] **Juan Tomás Celigüeta Lizarza**, "Método de los elementos finitos para Análisis Estructural" (4^a Edición, 2011)
- [14] **Qasim H. Shah, Hasan M. Abid**. "From Ls-PrePost to LS-DYNA: An introduction" (Lap Lambert Acad. Publ., 2011)

ANEXO A: Modelo Genérico

%PARÁMETROS que se pueden cambiar para generar el modelo del Panel
%Sandwich con núcleo de HONEYCOMB.

```
%nx1, ny1 INDICAN EL MALLADO DEL HONEYCOMB.
nx1=4;
ny1=4;
nx11=nx1/2;
%nx2, ny2, sg INDICAN EL MALLADO DE LAS PIELES.
nx2=250;
ny2=250;
sg=1;
l0=0;
%l ES LA LONGITUD DE LA CELDILLA HEXAGONAL DEL PANEL EN EL EJE X.
l=0.0064;
%d ES EL GROSOR/PROFUNDIDAD/ALTURA DEL NÚCLEO DE HONEYCOMB.
d=0.02;
%xp, yp SIRVEN PARA DESPLAZAR EL PROYECTIL SOBRE EL PANEL.
xp=0;
yp=0;
%a y b SON LAS MEDIDAS DE ANCHO Y LARGO DEL PANEL.
a=0.140;
b=0.140;
%e ES EL ESPESOR DE LAS PIELES DE FIBRA DE CARBONO.
e=0.002;
%r ES EL RADIO DEL PROYECTIL, QUE SERÁ ESFÉRICO.
r=0.00375;
%nr ES EL MALLADO DEL PROYECTIL.
nr=6;
%h ES LA ALTURA A LA QUE COLOCAMOS EL PROYECTIL.
h=0.006;
es=e/2;
ei=d+es;
l1=(l*sqrt(3.0)/3);
l2=(l/2);
l3=(l*sqrt(3.0)/6);
l4=(2*l*sqrt(3.0)/3);
l5=(5*l*sqrt(3.0)/6);
l6=(l*sqrt(3.0));
px=(a/2)+xp;
py=(-b/2)-yp;
```

% Número de elementos de una celdilla:

```
el1=(nx1*ny1*5);
el2=(nx11*ny1*2);
elt=(el1+el2);
```

%Datos para el traslado/copia de la celdilla inicial:

```
%Número de celdillas en X:
cx=a/l;
xt=0;
%Número de celdillas en Y:
cy=b/l6;
yt=0;
```



```
%Cálculo del número de elementos totales que tiene el HONEYCOMB, pues  
lo necesitaré más tarde cuando quiera crear las pieles como elementos  
TSHELLL.
```

```
ct=cx*cy;  
elh=elt*ct;
```

```
%Calculo ahora el número de elementos que tendrá cada piel:
```

```
elp=nx2*ny2*sg;  
elemt.total=elp+elh;  
enl=elh+1;  
en2=enl+elp;
```

```
fid=fopen('honeycomb3.cfile','w');
```

```
%Para evitar el problema de que el proyectil me elimine los nodos  
%duplicados de las pieles (acción automática) defino el proyectil lo  
%primero de todo:
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing spheresolid create ',px,' ',py,' ',h,'  
,r,' ',nr,' 1 0 0 0 1 0');  
fprintf(fid,'\n %s \n','meshing spheresolid accept 9 1 1  
spheresolid');
```

```
%Creamos la primera celdilla:
```

```
    %Diferencio las caras entre PARTE 1 y PARTE 2, pues las caras  
    verticales  
    %(según el eje Z) tienen un doble espesor, pues al fabricarlas es  
    por esa  
    %zona donde se pegan el resto de celdillas.
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx1,' ',ny1,' ',l0,' ',-  
l1,' ',l0,' ',l2,' ',-l3,' ',l0,' ',l2,' ',-l3,' ',-d,' ',l0,' ',-l1,'  
,-d);  
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 1 1 1 shell_4p');  
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx1,' ',ny1,' ',l2,' ',-  
l3,' ',l0,' ',l,' ',-l1,' ',l0,' ',l,' ',-l1,' ',-d,' ',l2,' ',-l3,'  
,-d);  
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 1 1 1 shell_4p');  
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx1,' ',ny1,' ',l,' ',-  
l4,' ',l0,' ',l2,' ',-l5,' ',l0,' ',l2,' ',-l5,' ',-d,' ',l,' ',-l4,'  
,-d);  
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 1 1 1 shell_4p');  
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx1,' ',ny1,' ',l2,' ',-  
l5,' ',l0,' ',l0,' ',-l4,' ',l0,' ',l0,' ',-l4,' ',-d,' ',l2,' ',-l5,'  
,-d);  
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 1 1 1 shell_4p');  
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx1,' ',ny1,' ',l0,' ',-14,' ',l0,' ',l0,' ',-11,' ',l0,' ',l0,' ',-11,' ',-d,' ',l0,' ',-14,' ',-d);
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 2 1 1 shell_4p');
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');

fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx11,' ',ny1,' ',l2,' ',-13,' ',l0,' ',l2,' ',l0,' ',l0,' ',l2,' ',l0,' ',-d,' ',l2,' ',-13,' ',-d);
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 2 1 1 shell_4p');
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');

fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx11,' ',ny1,' ',l2,' ',-15,' ',l0,' ',l2,' ',-16,' ',l0,' ',l2,' ',-16,' ',-d,' ',l2,' ',-15,' ',-d);
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 2 1 1 shell_4p');
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');

%Empiezo con el traslado de la celdilla para formar el HONEYCOMB. Para ello creo 2 bucles FOR:

for i=1:cx
    for j=1:cy
        fprintf(fid,'%s \n','genselect target node');
        fprintf(fid,'%s \n','genselect transfer 0');
        fprintf(fid,'%s','genselect node add shell 1:');
        fprintf(fid,'%i',elt);
        fprintf(fid,'%s',':');
        fprintf(fid,'%i \n',1);
        fprintf(fid,'%s %i','translate_model ',xt,' ',yt,' 0 copy 0 0');

        fprintf(fid,'\n %s \n','translate_model accept 0');
        fprintf(fid,'%s \n','genselect clear');
        yt=yt-16;

    end

    fprintf(fid,'%s \n','ac');
    fprintf(fid,'%s \n','genselect target node');
    fprintf(fid,'%s \n','genselect transfer 0');
    fprintf(fid,'%s','genselect node add shell 1:');
    fprintf(fid,'%i',elt);
    fprintf(fid,'%s',':');
    fprintf(fid,'%i \n',1);
    fprintf(fid,'%s %i','translate_model ',xt,' ',yt,' 0 copy 0 0');

    fprintf(fid,'\n %s \n','translate_model accept 0');
    fprintf(fid,'%s \n','genselect clear');
    xt=xt+1;
    yt=0;

end

fprintf(fid,'%s \n','ac');

%Mergeo el HONEYCOMB para eliminar los nodos coincidentes:

fprintf(fid,'%s \n','genselect target node');
fprintf(fid,'%s \n','dupnode showdup 0.000014');
fprintf(fid,'%s \n','dupnode merge 0.000014');
fprintf(fid,'%s \n','genselect target node');
```

```
fprintf(fid,'%s \n','genselect clear');  
fprintf(fid,'%s \n','dupnode accept');
```

%Creo las pieles, primeramente como elementos SHELL, y luego las transformaré a elementos TSHELL. Solo creo la piel más cercana al HONEYCOMB las pieles siguientes las crearé haciendo una traslación, al igual que he hecho con las celdillas del HONEYCOMB.

```
%PIEL SUPERIOR I  
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx2,' ',ny2,' ',l0,'  
' ,l0,' ',es,' ',a,' ',l0,' ',es,' ',a,' ',-b,' ',es,' ',l0,' ',-b,'  
' ,es);  
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 3 1 1 shell_4p');  
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');
```

```
%PIEL INFERIOR I
```

```
fprintf(fid,'%s %i','meshing 4pshell create',nx2,' ',ny2,' ',l0,'  
' ,l0,' ',-d,' ',a,' ',l0,' ',-d,' ',a,' ',-b,' ',-d,' ',l0,' ',-b,'  
' ,d);  
fprintf(fid,'\n %s','meshing 4pshell accept 4 1 1 shell_4p');  
fprintf(fid,'\n %s \n','ac');
```

```
fprintf(fid,'\n %s','front');  
fprintf(fid,'\n %s','ac');
```

%Convierto estas dos pieles en elementos TSHELL antes de copiarlas y trasladarlas(con el objetivo de estudiar la deslaminación)

```
%PIEL SUPERIOR I
```

```
fprintf(fid,'\n %s','genselect target shell');  
fprintf(fid,'\n %s','elgenerate gentshell 1');  
fprintf(fid,'\n %s','genselect shell add part 3/0');  
fprintf(fid,'\n %s','');  
fprintf(fid,'%s %i','elgenerate solid shelloffset 5 ',en1,' ',es,'  
' ,sg);  
fprintf(fid,'\n %s','genselect clear');  
fprintf(fid,'\n %s','elgenerate accept');
```

```
%PIEL INFERIOR I
```

```
fprintf(fid,'\n %s','genselect target shell');  
fprintf(fid,'\n %s','elgenerate gentshell 1');  
fprintf(fid,'\n %s','genselect shell add part 4/0');  
fprintf(fid,'\n %s','');  
fprintf(fid,'%s %i','elgenerate solid shelloffset 6 ',en2,' ',es,'  
' ,sg);  
fprintf(fid,'\n %s','genselect clear');  
fprintf(fid,'\n %s','elgenerate accept');
```

%Elimino los elementos SHELL de las pieles:

```
%Elimino la PIEL SUPERIOR I  
fprintf(fid,'\n %s','delelement unrefn 1');
```

```
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement target element');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement target element');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect element add part 3/0');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement target shell');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement delete');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement accept');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect clear');

%Elimino la PIEL INFERIOR I
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement unrefn 1');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement target element');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement target element');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect element add part 4/0');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement target shell');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement delete');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement accept');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect clear');

%Creo las otras dos pieles, copiando y trasladando las ya creadas.
%Piel SUPERIOR II
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect target node');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect transfer 0');
fprintf(fid, '\n %s \n', 'genselect node add part 5/0 ');
fprintf(fid, '%s %i', 'translate_model 0 0 ', es, ' copy 0 7');
fprintf(fid, '\n %s', 'translate_model accept 7 ');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect clear');

%Piel INFERIOR II
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect target node');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect target node');
fprintf(fid, '\n %s', 'occfilter clear');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect transfer 0');
fprintf(fid, '\n %s \n', 'genselect node add part 6/0 ');
fprintf(fid, '%s %i', 'translate_model 0 0 ', -es, ' copy 0 8');
fprintf(fid, '\n %s', 'translate_model accept 8 ');
fprintf(fid, '\n %s', 'genselect clear');

%Elimino las partes 3 y 4 que no están en uso para evitar problemas

fprintf(fid, '\n %s', 'partdata delete 3 4');
fprintf(fid, '\n %s', 'Build Rendering data');
fprintf(fid, '\n %s', 'delelement unrefn 0');

open('honeycomb3.cfile');
```

ANEXO B: Propiedades de las Partes

```
%Definimos el espesor del Honeycomb mediante el parámetro "e".
e=4;
e2=2*e;

%Definimos el ángulo de impacto del proyectil (en radianes).
a=pi/4;

%Definimos la velocidad inicial y el tiempo que tarda el proyectil en
atravesar el panel.
v=-100;
vy=0;
vz=v*cos(a);
vx=v*sin(a);

t=2.0e-4;

fid=fopen('tarjetas_honeycomb.cfile','w');

%TARJETAS DE LAS SECCIONES

%Honeycomb simple= espesor teórico del honeycomb
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*SECTION_SHELL_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','honeycomb simple');
fprintf(fid,'%s \n','1,2,1.000000,2,1,0,0,1');
fprintf(fid,'%s %i',' ',e,'e-5',' ',e,'e-5',' ',e,'e-5',' ',e,'e-
5,0.000,0.000,0.000,0');
fprintf(fid,'%s \n',' ');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','SECTION_SHELL');
fprintf(fid,'\n %s \n',' ');

%Honeycomb doble=espesor de las paredes por donde se pegan las otras
celdas.
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*SECTION_SHELL_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','honeycomb doble');
fprintf(fid,'%s \n','2,2,1.000000,2,1,0,0,1');
fprintf(fid,'%s %i',' ',e2,'e-5',' ',e2,'e-5',' ',e2,'e-5',' ',e2,'e-
5,0.000,0.000,0.000,0');
fprintf(fid,'%s \n',' ');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','SECTION_SHELL');
fprintf(fid,'\n %s \n',' ');

%Proyectil (4)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*SECTION_SOLID_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','Proyectil');
fprintf(fid,'%s \n','4,1,0');
fprintf(fid,'%s \n',' ');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
```

```
fprintf(fid,'%s \n','SECTION_SHELL');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%TARJETAS DEL MATERIAL

%Material del Honeycomb (Aluminio)(MID 1)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','Honeycomb');
fprintf(fid,'%s
\n','1,2.7403E+03,6.8948E+10,0.330,1.5423E+08,0.038305,0.0,0.0');
fprintf(fid,'%s \n','0.0,0.0,0.3324');
fprintf(fid,'%s \n','');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','MAT_POWER_LAW_PLASTICITY');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Tarjeta extra para el material del Honeycomb
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*MAT_ADD_EROSION_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','Honeycomb_mejora');
%
%          mid      excl      mxpres      mneps      effeps
voleps      numfip      ncs
fprintf(fid,'%s
\n','1,1234.0000,1234.0000,1234.0000,0.230000,1234.0000, 1.000000,
1234.0000');
%
%          mnpres      sigpl      sigvm      mxeps
epssh      sigth      impulse      failtm
fprintf(fid,'%s \n',' 1234.0000, 1234.0000, 1234.0000, 0.000,
1234.0000, 1234.0000, 1234.0000, 1234.0000');
%
%          idam      dmgtyp      lcsdgc      ecrit      dmgepx
dcrit      fadexp      lcregd
fprintf(fid,'%s \n',' 0, 0.000,0, 0.000, 1234.0000, 1234.0000,
0.000,0.000');
%
%          lcflc      epsthin
fprintf(fid,'%s \n','0, 1234, 1234.0000');
fprintf(fid,'%s \n','');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','MAT_ADD_EROSION');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

% ALUMINUM 3003-H12 SHEET
%
% 34      Power Law Plasticity (MAT_018)
%      SI Units (kg, m, s, N, Pa, Joule)
% Material density . . . . . 2.7403E+03 Kg/m^3
% Young's Modulus . . . . . 6.8948E+10 Pa
% Shear Modulus . . . . . 2.5920E+10 Pa
% Bulk Modulus . . . . . 6.7596E+10 Pa
% Poisson's ratio . . . . . 0.3300
% Yield stress at offset . . . 1.2411E+08 Pa
% Engineering ultimate stress. 1.3100E+08 Pa
% Elongation at failure . . . . 10.000 %
% CTE . . . . . 2.3220E-11 1/C
% Yield offset . . . . . 0.2000 %
% ----- Calculated values -----
% Strain Hardening equation      s = s0 * e^m
```

```
% Equation constants          s0 = 1.54233E+08    m = 0.038305
% Yield point                 sy = 1.20952E+08    ey = 0.001754
% Ultimate (Engineering)      SU = 1.31000E+08    EU = 0.039048
% Ultimate Stress/Total Strain sut = 1.36116E+08    eut = 0.038305
% Effective Plastic Failure Strain epfs = 0.332400
%#      MID      RHO      E      PR      K      N src
srp
%      Kg/m^3      Pa      Pa
%      1, 2.7403E+03, 6.8948E+10, 0.330, 1.5423E+08, 0.038305, 0.0,
0.0
%#      sigy      vp      epfs
%      0.0      0.0      0.3324');

%Material de las pieles (Acero MID 3)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','Pieles');
%      mid      ro      ea      eb      (ec)      prba
taul      gammal
fprintf(fid,'%s \n','2, 1570.0000, 6.8000E+10, 6.8000E+10, 0,
0.220000, 0.000, 0.000');
%      gab      gbc      gca      slimt1      slimc1
slimt2      slimc2      slims
fprintf(fid,'%s \n','5.0000E+9, 4.5000E+9, 4.5000E+9, 0.5, 0.5, 0.5,
0.5, 0.5');
%      aopt      tsize      erods      soft      fs
fprintf(fid,'%s \n','0.000, 0.000, 0.05, 0.000, 1');
%      xp      yp      zp      a1      a2      a3
fprintf(fid,'%s \n','0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000');
%      v1      v2      v3      d1      d2      d3      beta
fprintf(fid,'%s \n','0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000,
0.000');
%      ellc      ellt      e22c      e22t      gms
fprintf(fid,'%s \n','0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000');
%      xc      xt      yc      yt      sc
fprintf(fid,'%s \n','8.8000E+8, 8.8000E+8, 8.8000E+8, 8.8000E+8,
8.4000E+7');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Material del proyectil (Acero MID 2)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*MAT_RIGID_TITLE');
fprintf(fid,'%s \n','Proyectil');
fprintf(fid,'%s \n','3,7850,210e9,0.3,0.000,0.000,0.000');
fprintf(fid,'%s \n','1.000000,2,0');
fprintf(fid,'%s \n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','MAT_RIGID');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Seccion Pieles (3)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*PART_COMPOSITE_TSHELL');
```

```
fprintf(fid, '%s \n', 'Piel1');  
fprintf(fid, '%s \n', '5,1,0.833000,0.000,0.000,0,0,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,0,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '*END');  
fprintf(fid, '%s \n', 'keyword updatekind');  
fprintf(fid, '%s \n', 'PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '\n %s \n', '');
```

```
fprintf(fid, '%s \n', 'KEYWORD INPUT');  
fprintf(fid, '%s \n', '*PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '%s \n', 'Piel2');  
fprintf(fid, '%s \n', '6,1,0.833000,0.000,0.000,0,0,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,0,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '*END');  
fprintf(fid, '%s \n', 'keyword updatekind');  
fprintf(fid, '%s \n', 'PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '\n %s \n', '');
```

```
fprintf(fid, '%s \n', 'KEYWORD INPUT');  
fprintf(fid, '%s \n', '*PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '%s \n', 'Piel3');  
fprintf(fid, '%s \n', '7,1,0.833000,0.000,0.000,0,0,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,0,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '*END');  
fprintf(fid, '%s \n', 'keyword updatekind');  
fprintf(fid, '%s \n', 'PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '\n %s \n', '');
```

```
fprintf(fid, '%s \n', 'KEYWORD INPUT');  
fprintf(fid, '%s \n', '*PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '%s \n', 'Piel42');  
fprintf(fid, '%s \n', '8,1,0.833000,0.000,0.000,0,0,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,2.00E-4,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '2,2.00E-4,0.000,0,2,0,0.000,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '*END');  
fprintf(fid, '%s \n', 'keyword updatekind');  
fprintf(fid, '%s \n', 'PART_COMPOSITE_TSHELL');  
fprintf(fid, '\n %s \n', '');
```

%ASIGNO A CADA PARTE SU MATERIA Y SECCIÓN

%Honeycomb simple

```
fprintf(fid, '%s \n', 'KEYWORD INPUT');  
fprintf(fid, '%s \n', '*PART');  
fprintf(fid, '%s \n', 'shell_4p');  
fprintf(fid, '%s \n', '1,1,1,0,0,0,0,0');  
fprintf(fid, '%s \n', '*END');  
fprintf(fid, '%s \n', 'keyword updatekind');  
fprintf(fid, '%s \n', 'PART');  
fprintf(fid, '\n %s \n', '');
```

%Honeycomb doble


```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*PART');
fprintf(fid,'%s \n','shell_4p');
fprintf(fid,'%s \n','2,2,1,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','PART');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Proyectil
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*PART');
fprintf(fid,'%s \n','spheresolid');
fprintf(fid,'%s \n','9,4,3,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','PART');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%TARJETAS DE CONTACTO

%Contacto 1 (Piel1-Piel2)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID');
fprintf(fid,'%s \n','1,Piel1-Piel2');
%          ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
fprintf(fid,'%s \n','2,3,0,0,0,0,1,1');
%          fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
fprintf(fid,'%s \n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
%          sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt
fsf      vsf
fprintf(fid,'%s \n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000');
%          option      nfls      sfls      param      eraten      erates      ct2cn
cn
fprintf(fid,'%s \n','9,1.1e7, 4.5e7,1.42,287, 1830,0.75,1e14');
%          soft      sofsc1      lcidab      maxpar      sbopt
depth      bsort      frcfrq
fprintf(fid,'%s \n','1, 0.100000, 0, 1.025000, 2.000000, 2, 0, 1');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Contacto 2 (Piel3-Piel4)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID');
fprintf(fid,'%s \n','2,Piel3-Piel4');
%          ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
fprintf(fid,'%s \n','6,7,0,0,0,0,1,1');
%          fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
fprintf(fid,'%s \n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
%          sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt
fsf      vsf
```

```
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
%
option nfls sfls param eraten erates ct2cn cn
fprintf(fid,'%s \n','9,1.1e7, 4.5e7,1.42,287, 1830,0.75,1e14');
%
soft sofscf lcidab maxpar sbopt
depth bsort frcfrq
fprintf(fid,'%s \n','1, 0.100000, 0, 1.025000, 2.000000,
2, 0, 1');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Contacto 3 (Piel2-Honeycomb)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_ID');
fprintf(fid,'%s \n','3,Piel2-Honeycomb');
fprintf(fid,'%s \n','1,4,4,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s
\n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Contacto 4 (Piel3-Honeycomb)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_ID');
fprintf(fid,'%s \n','4,Honeycomb-Piel3');
fprintf(fid,'%s \n','2,5,4,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s
\n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Contacto 5 (Honeycomb-Honeycomb)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID');
fprintf(fid,'%s \n','5,Honeycomb-Honeycomb');
fprintf(fid,'%s \n','8,8,0,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s
\n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

```
%Contacto 6 (Penetración honeycomb en piel)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID');
fprintf(fid,'%s \n','6,Honeycomb-Piel (PENETRACION)');
fprintf(fid,'%s \n','9,10,0,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s
\n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Contacto 7 (Honeycomb nodos Vs Proyectoil elementos)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE_ID');
fprintf(fid,'%s \n','7,Proyectoil-Honeycomb');
%          ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
fprintf(fid,'%s \n','5,11,4,0,0,0,0,0');
%          fs fd dc vc vdc penchk bt dt
fprintf(fid,'%s
\n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
%          sfs sfm sst mst sfst sfmt
fsf vsf
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
%          soft sofscsl lcidab maxpar sbopt depth bsort
rcfrq
fprintf(fid,'%s \n','2,0.100000,0,1.025000,2.000000,2,0,1');
%          penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk
sldstf
fprintf(fid,'%s \n','0.000,0,0,0,0,0,0.000,0.000');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

%Contacto 8 (Proyectoil Vs Panel)
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID');
fprintf(fid,'%s \n','8,PROYECTIL VS ZONA IMPACTO');
fprintf(fid,'%s \n','1,11,0,0,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s
\n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0.000,1.0000E+20');
fprintf(fid,'%s
\n','1.000000,1.000000,0.000,0.000,1.000000,1.000000,1.000000,1.000000
');
%          soft sofscsl lcidab maxpar sbopt depth bsort
rcfrq
fprintf(fid,'%s \n','2,0.100000,0,1.025000,2.000000,2,0,1');
fprintf(fid,'%s \n','0.000,0,0,0,0,0,0.000,0.000');

fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

%Contacto para intentar evitar el error de Volumen Negativo

```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTACT_INTERIOR');
%
% psid
fprintf(fid,'%s \n','1');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTACT_INTERIOR');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

%TARJETAS DE CONTROL

%Velocidad inicial del proyectil

```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*INITIAL_VELOCITY_GENERATION');
fprintf(fid,'%s \n','3,3,0.000',vx,',',',',vy,',',',',vz,',',',',0,0');
fprintf(fid,'%s \n','');
fprintf(fid,'%s \n','0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0.000,0,0');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','INITIAL_VELOCITY_GENERATION');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

%Tiempo final.

```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*CONTROL_TERMINATION');
fprintf(fid,'%s \n','t',',',',',0,0.000,0.000,0.000');
fprintf(fid,'%s \n','');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','CONTROL_TERMINATION');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

%DATABASE BINARY D3PLOT

```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*DATABASE_BINARY_D3PLOT');
fprintf(fid,'%s \n','1.5000E-6,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s \n','0');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','DATABASE_BINARY_D3PLOT');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

%DATABASE ATDOUT

```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*DATABASE_ATDOUT');
fprintf(fid,'%s \n','1.5000E-6,0,0,1');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','DATABASE_ATDOUT');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

%DATABASE BINARY INTFOR

```
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*DATABASE_BINARY_INTFOR');
fprintf(fid,'%s \n','6.0000E-6,0,0,0,0');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','DATABASE_BINARY_INTFOR');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
```

```
%DATABASE EXTENT BINARY
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*DATABASE_EXTENT_BINARY');
fprintf(fid,'%s \n','50,0,10,0,1,1,1,1');
fprintf(fid,'%s \n','0,0,0,1,1,1,2,1');
fprintf(fid,'%s \n','0,0,1.000000,0,0,0STRESS,STRESS');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','DATABASE_EXTENT_BINARY');
fprintf(fid,'\n %s \n','');
%DATABASE EXTENT INTFOR
fprintf(fid,'%s \n','KEYWORD INPUT');
fprintf(fid,'%s \n','*DATABASE_EXTENT_INTFOR');
fprintf(fid,'%s \n','1,-1,-1,-1,-1,1');
fprintf(fid,'%s \n','*END');
fprintf(fid,'%s \n','keyword updatekind');
fprintf(fid,'%s \n','DATABASE_EXTENT_INTFOR');
fprintf(fid,'\n %s \n','');

open('tarjetas_honeycomb.cfile');
```

ANEXO C: Reduced Input

*KEYWORD

*CONTROL_TERMINATION

```
# endtim endcyc dtmin endeng endmas
1.3000E-4 0 0.000 0.000 0.000
```

*DATABASE_ATDOUT

```
# dt binary lcur ioopt
1.5000E-6 0 0 1
```

*DATABASE_BINARY_D3PLOT

```
# dt lcdt beam npltc psetid
1.5000E-6 0 0 0 0
```

```
# ioopt
0
```

*DATABASE_BINARY_INTFOR

```
# dt lcdt beam npltc psetid
6.0000E-6 0 0 0 0
```

*DATABASE_EXTENT_BINARY

```
# neiph neips maxint strflg sigflg epsflg rltflg engflg
50 0 10 0 1 1 1 1
# cmpflg ieverp beamip dcomp shge stssz n3thdt ialemat
0 0 0 1 1 1 2 1
# nintsld pkp_sen sclp unused msscl therm intout nodout
0 0 1.000000 0 0 OSTRESS STRESS
# dtdt resplt
0 0
```

*DATABASE_EXTENT_INTFOR

```
# nglbv nvelo npresu nshear nforce ngapc
1 -1 -1 -1 -1 1
```

*BOUNDARY_SPC_SET

```
# nsid cid dofx dofy dofz dofrx dofry dofrz
4 0 1 1 1 1 1 1
```

*SET_NODE_LIST_TITLE

```
NODESET(SPC) 4
```

```
# sid da1 da2 da3 da4 solver
4 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
```

*CONTACT_INTERIOR

```
# psid
1
```

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID

```
# cid title
1Piel1-Piel2
```

```
# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
```

```
      2      3      0      0      0      0      1      1
#   fs   fd   dc   vc   vdc   penchk   bt   dt
    0.000  0.000  0.000  0.000  0.000    0  0.0001.0000E+20
#   sfs   sfm   sst   mst   sfst   sfmt   fsf   vsf
    1.000000 1.000000  0.000  0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
# option   nfls   sfls   param   eraten   erates   ct2cn   cn
      9 1.1000E+7 4.5000E+7 1.420000 287.00000 1830.0000 0.7500001.0000E+14
# soft   sofsc   lcidab   maxpar   sbopt   depth   bsort   frcfrq
      1 0.100000    0 1.025000 2.000000    2    0    1
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel 1 Inf
#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      2  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel 2 Sup
#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      3  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK_ID
#   cid                                     title
      2Piel3-Piel4
#   ssid   msid   sstyp   mstyp   sboxid   mboxid   spr   mpr
      6    7    0    0    0    0    1    1
#   fs   fd   dc   vc   vdc   penchk   bt   dt
    0.000  0.000  0.000  0.000  0.000    0  0.0001.0000E+20
#   sfs   sfm   sst   mst   sfst   sfmt   fsf   vsf
    1.000000 1.000000  0.000  0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
# option   nfls   sfls   param   eraten   erates   ct2cn   cn
      9 1.1000E+7 4.5000E+7 1.420000 287.00000 1830.0000 0.7500001.0000E+14
# soft   sofsc   lcidab   maxpar   sbopt   depth   bsort   frcfrq
      1 0.100000    0 1.025000 2.000000    2    0    1
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel 3 Inf
#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      6  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel 4 Sup
#   sid   da1   da2   da3   da4   solver
      7  0.000  0.000  0.000  0.000MECH
*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_ID
#   cid                                     title
      3Piel2-Honeycomb
#   ssid   msid   sstyp   mstyp   sboxid   mboxid   spr   mpr
      1    4    4    0    0    0    0    0
#   fs   fd   dc   vc   vdc   penchk   bt   dt
    0.000  0.000  0.000  0.000  0.000    0  0.0001.0000E+20
```

```
# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_NODE_LIST_TITLE
Honeycomb Sup
# sid da1 da2 da3 da4 solver
1 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel 2 Inf
# sid da1 da2 da3 da4 solver
4 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_ID
# cid title
4Honeycomb-Piel3
# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
2 5 4 0 0 0 0 0
# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_NODE_LIST_TITLE
Honeycomb Inf
# sid da1 da2 da3 da4 solver
2 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel 3 Sup
# sid da1 da2 da3 da4 solver
5 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
# cid title
5Honeycomb-Honeycomb
# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
8 8 0 0 0 0 0 0
# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
HC central
# sid da1 da2 da3 da4 solver
8 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
# cid title
6Honeycomb-Piel(PENETRACION)
# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
9 10 0 0 0 0 0 0
```



```
# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*SET_SEGMENT_TITLE
HC Impacto
# sid da1 da2 da3 da4 solver
9 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*SET_SEGMENT_TITLE
Piel Impacto
# sid da1 da2 da3 da4 solver
10 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE_ID
# cid title
7Proyectil-Honeycomb
# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
5 11 4 0 0 0 0 0
# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
# soft sofsc lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfrq
2 0.100000 0 1.025000 2.000000 2 0 1
# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
0.000 0 0 0 0 0 0.000 0.000
*SET_NODE_LIST_TITLE
Honeycomb Imp
# sid da1 da2 da3 da4 solver
5 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*SET_SEGMENT_TITLE
Proyectil
# sid da1 da2 da3 da4 solver
11 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
# cid title
8PROYECTILVSZONAIMPACTO
# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
1 11 0 0 0 0 0 0
# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0.0001.0000E+20
# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf
1.000000 1.000000 0.000 0.000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
# soft sofsc lcidab maxpar sbopt depth bsort frcfrq
2 0.100000 0 1.025000 2.000000 2 0 1
# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
```

```
0.000 0 0 0 0 0 0.000 0.000
*SET_SEGMENT_TITLE
Zona Impacto
# sid da1 da2 da3 da4 solver
1 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
*PART
# title
shell_4p
# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
1 1 1 0 0 0 0 0
*SECTION_SHELL_TITLE
honeycomb simple
# secid elform shrf nip propt qr/irid icomp setyp
1 2 1.000000 2 1 0 0 1
# t1 t2 t3 t4 nloc marea idof edgset
6.0000E-5 6.0000E-5 6.0000E-5 6.0000E-5 0.000 0.000 0.000 0
*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY_TITLE
Honeycomb
# mid ro e pr k n src srp
1 2740.30006.8948E+10 0.330000 1.5423E+8 0.038305 0.000 0.000
# sigy vp epsf
0.000 0.000 0.332400
*PART
# title
shell_4p
# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
2 2 1 0 0 0 0 0
*SECTION_SHELL_TITLE
honeycomb doble
# secid elform shrf nip propt qr/irid icomp setyp
2 2 1.000000 2 1 0 0 1
# t1 t2 t3 t4 nloc marea idof edgset
1.2000E-4 1.2000E-4 1.2000E-4 1.2000E-4 0.000 0.000 0.000 0
*PART_COMPOSITE_TSHELL
# title
Piel1
# pid elform shrf unused unused hgid unused tshear
5 1 0.833000 0.000 0.000 0 0 0
# mid1 thick1 b1 ithid1 mid2 thick2 b2 ithid2
2 2.0000E-4 0.000 0 2 2.0000E-4 0.000 0
2 2.0000E-4 0.000 0 2 2.0000E-4 0.000 0
2 2.0000E-4 0.000 0 2 0.000 0.000 0
*PART_COMPOSITE_TSHELL
# title
Piel2
```

```
# pid  elform  shrf  unused  unused  hgid  unused  tshear
   6    1 0.833000  0.000  0.000    0    0    0
# mid1  thick1   b1  ithid1  mid2  thick2   b2  ithid2
   2 2.0000E-4  0.000    0    2 2.0000E-4  0.000    0
   2 2.0000E-4  0.000    0    2 2.0000E-4  0.000    0
   2 2.0000E-4  0.000    0    2  0.000  0.000    0
```

***PART_COMPOSITE_TSHELL**

title

Piel3

```
# pid  elform  shrf  unused  unused  hgid  unused  tshear
   7    1 0.833000  0.000  0.000    0    0    0
# mid1  thick1   b1  ithid1  mid2  thick2   b2  ithid2
   2 2.0000E-4  0.000    0    2 2.0000E-4  0.000    0
   2 2.0000E-4  0.000    0    2 2.0000E-4  0.000    0
   2 2.0000E-4  0.000    0    2  0.000  0.000    0
```

***PART_COMPOSITE_TSHELL**

title

Piel42

```
# pid  elform  shrf  unused  unused  hgid  unused  tshear
   8    1 0.833000  0.000  0.000    0    0    0
# mid1  thick1   b1  ithid1  mid2  thick2   b2  ithid2
   2 2.0000E-4  0.000    0    2 2.0000E-4  0.000    0
   2 2.0000E-4  0.000    0    2 2.0000E-4  0.000    0
   2 2.0000E-4  0.000    0    2  0.000  0.000    0
```

***PART**

title

spheresolid

```
# pid  secid   mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
   9    4     3    0     0    0     0     0
```

***SECTION_SOLID_TITLE**

Proyectil

secid elform aet

4 1 0

***MAT_RIGID_TITLE**

Proyectil

```
# mid  ro  e  pr  n  couple  m  alias
   3 7850.00002.1000E+11 0.300000  0.000  0.000  0.000
```

cmo con1 con2

1.000000 2 7

lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3

0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

***MAT_ADD_EROSION_TITLE**

Honeycomb_mejora

mid excl mxpres mneps effeps voleps numfip ncs

1 1234.0000 1234.0000 1234.0000 0.200000 1234.0000 1.000000 1234.0000

```
# mnpres sigp1 sigvm mxeps epssh sigth impulse failtm
1234.0000 1234.0000 1234.0000 0.000 1234.0000 1234.0000 1234.0000 1234.0000
# idam dmgtyp lcsdg ecrit dmgexp dcrit fadexp lcregd
0 0.000 0 0.000 1234.0000 1234.0000 0.000 0.000
# lcflid epsthin
0 1234 1234.0000
*MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC_TITLE
Pielas
# mid ro ea eb (ec) prba tau1 gamma1
2 1570.0000 6.8000E+10 6.8000E+10 0.000 0.220000 0.000 0.000
# gab gbc gca slimt1 slimc1 slimt2 slimc2 slimc3
5.0000E+9 4.5000E+9 4.5000E+9 0.500000 0.500000 0.500000 0.500000 0.500000
# aopt tsize erods soft fs
0.000 0.000 0.050000 0.000 1.000000
# xp yp zp a1 a2 a3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
# v1 v2 v3 d1 d2 d3 beta
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
# e11c e11t e22c e22t gms
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
# xc xt yc yt sc
8.8000E+8 8.8000E+8 8.8000E+8 8.8000E+8 8.4000E+7
*INITIAL_VELOCITY_GENERATION
#nsid/pid styp omega vx vy vz ivatn icid
3 3 0.000 0.000 0.000-300.00000 0 0
# xc yc zc nx ny nz phase iridid
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0
*SET_NODE_LIST_TITLE
Proyectil
# sid da1 da2 da3 da4 solver
3 0.000 0.000 0.000 0.000MECH

*SET_PART_LIST_TITLE
TODO
# sid da1 da2 da3 da4 solver
1 0.000 0.000 0.000 0.000MECH
# pid1 pid2 pid3 pid4 pid5 pid6 pid7 pid8
1 2 5 6 7 8 0 0
*END
```